

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**Тимохін Олександр Вікторович**

УДК 621.316

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**Інформаційне забезпечення систем керування електричними мережами на  
основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ О. В. Тимохін

**Науковий керівник:** Яндульський Олександр Станіславович, д.т.н, професор.

## АНОТАЦІЯ

*Тимохін О.В.* Інформаційне забезпечення систем керування електричними мережами на основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» (141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі підвищення ефективності інформаційного забезпечення систем керування РЕМ 0,4...10 кВ в умовах впровадження технологій SmartGrid шляхом використання електричних мереж для передачі широкополосних сигналів з покращеними характеристиками.

У першому розділі проведено аналіз стану РЕМ України як об'єкта керування. Встановлено, що сучасні тенденції розвитку СК РЕМ в умовах збільшення кількості ВДЕ та інших об'єктів розосередженої генерації, а також підвищення вимог до якості електропостачання споживачів обумовлюють необхідність вирішення нових задач керування, що потребує відповідного інформаційного забезпечення СК.

Встановлено, що в існуючих інформаційних мережах використовують різноманітні інформаційні інтерфейси та різноманітні протоколи передачі даних. При цьому групи об'єктів моніторингу та керування РЕМ локалізовані в межах одного об'єкта РЕМ, що дозволяє об'єднання інформаційних потоків від цих об'єктів РЕМ в єдиний потік при передачі на ДП РЕМ. Тобто, на системи інформаційного забезпечення СК РЕМ покладається комплекс нових задач по інтеграції до СК РЕМ великої кількості об'єктів керування РЕМ із різними інтерфейсами, швидкостями та протоколами передачі. Об'єднання об'єктів моніторингу та керування РЕМ в межах об'єкта РЕМ обумовлює необхідність підвищення швидкості передачі інформаційних повідомлень.

Відзначено, що при створенні систем інформаційного забезпечення СК РЕМ з великою кількістю об'єктів моніторингу та керування доцільним є використання як існуючих засобів інформаційного забезпечення, так і розробка нових. При цьому слід зазначити, що для потреб інформаційного забезпечення СК РЕМ використовуються різні засоби інформаційного забезпечення, що ускладнює процес інтеграції їх в СК РЕМ.

Проведений аналіз показав, що внаслідок співпадіння топології РЕМ із топологією інформаційних потоків СК РЕМ, а також по техніко-економічним показникам доцільним при побудові засобів інформаційного забезпечення із використанням РЕМ 0,4...10 кВ як середовища для передачі інформаційних сигналів.

Однак існуючі підходи до побудови систем передачі повідомлень по РЕМ 0,4...10 кВ не в повній мірі відповідають новим вимогам інформаційного забезпечення СК РЕМ щодо швидкості та ефективності передачі. Тому виникає необхідність в подальшому розвитку підходів побудови систем передачі інформації по РЕМ.

На основі проведеного аналізу існуючих методів і засобів передачі сигналів по РЕМ встановлено доцільність використання ШПС в якості інформаційних сигналів що передаються по РЕМ 0,4...10 кВ, які на відміну від існуючих сигналів дозволяють здійснити багатоканальну передачу сигналів, збільшити швидкість і завадостійкість. Але обмеженість полоси частот, що придатна для передачі сигналів по РЕМ потребує подальшого розвитку підходів формування ШПС до умов передачі по РЕМ 0,4...10 кВ.

У другому розділі проведено аналіз сигналів, які використовуються для передачі по РЕМ в системах інформаційного забезпечення СК РЕМ, в тому числі класичних вузькополосних сигналів і сучасних ШПС.

В спектрах сигналів для передачі по РЕМ, що отримані класичними методами 90% енергії сигналу знаходиться в межах першої пелюстки спектру. При цьому решта енергії втрачається, що призводить до спотворення сигналу.

Для зменшення частини енергії, що виходить за рамки першої пелюстки, запропоновано новий метод, який полягає у додатковому перетворенні сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити енергію ШПС в полосі передачі та підвищити ефективність використання частотного діапазону при передачі ШПС по РЕМ.

Для оцінки впливу частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ на процес розповсюдження сигналів по РЕМ запропоновано підхід на основі кореляційного аналізу між сигналами на стороні передачі та прийому.

Із застосуванням запропонованого підходу отримано результати оцінки впливу АЧХ та ФЧХ РЕМ на процес розповсюдження ШПС по РЕМ, аналіз яких показав його залежність від нелінійності АЧХ та ФЧХ РЕМ.

У третьому розділі представлені результати експериментального дослідження характеристик РЕМ 0,4...10 кВ, які проводилися на РЕМ 0,4-10 кВ п.г.т. Диканька, та РЕМ кафедри АЕ корпусу №20 НТУУ КПІ імені Ігоря Сікорського.

Дослідження проводилися по визначенню повного вхідного опору РЕМ, амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик РЕМ для мережі 0,4 кВ та проходження сигналів із мережі 0,4 кВ в мережу 10 кВ.

Для дослідження ФЧХ було запропоновано новий метод, що дозволяє проводити дослідження ФЧХ РЕМ за умов віддаленості точок передачі та прийому одна від одної.

Розроблений метод побудований на принципі вимірювання відносного зсуву фаз між сигналами, що передаються на різних частотах, які є зфазованими на стороні передачі. Він дозволяє визначити фазовий зсув для дискретних значень частот між частотами, що відрізняються між собою в два рази по відношенню до обраної початкової частоти, що дозволяє отримати відносну ФЧХ РЕМ.

У четвертому розділі проведено аналіз аналітичних та наближених методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів для розрахунку частотних характеристик РЕМ.

Проведений аналіз наближених методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів показав, що вони основані на представленні ВЧ тракту по РЕМ 2-а характеристиками: загасання тракту та характеристичний опір тракту, що недостатньо для оцінки процесу розповсюдження ШПС по РЕМ.

Точним методом розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів є метод на основі представлення елементів РЕМ як ліній із розподіленими параметрами, але використання такого методу перешкоджає відсутність параметрів елементів РЕМ.

Для вирішення задачі визначення параметрів елементів РЕМ запропоновано використання чисельного розв'язку методом скінчених елементів рівнянь Максвелла для просторових моделей елементів РЕМ та перевірено правильність отриманих результатів.

*Ключові слова:* системи керування, інформаційні мережі, передача сигналів, широкополосний сигнал, розподільна електрична мережа, амплітудно-частотна характеристика, фазочастотна характеристика.

### **ABSTRACT**

Timokhin O.V. Information support of electric networks control systems on the basis of broadband signals transmission by distributive electrical networks 0,4...10 kV. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) degree in technical sciences on specialty 05.14.02 – «Power stations, networks and systems» (141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and practical task of information provision efficiency increasing for distributive electrical networks (DEN) 0,4...10 kV control systems (CS) in conditions of SmartGrid technologies introduction by using electric networks for broadband signals with improved characteristics transmission.

The first section analyzes distributive electrical networks of Ukraine status as a control object. It is established that the current trends in the development of DEN CS in conditions of increasing the number of RES and other objects of distributed generation, as well as increasing the requirements to the quality of electricity supply to consumers, necessitates the solution of new management tasks that require the appropriate information provision of the CS.

It is established, that in existing information networks various information interfaces and various data transfer protocols are used. At the same time, groups of monitoring and management objects of DEN are localized within one object of DEN, which allows information flows merging from these objects of DEN into a single stream when transmitted to the DEN CS. In other words, on the DEN CS information provision system lays a set of new tasks for integrate into the DEN CS large number of control objects of DEN with different transmission interfaces, speeds and protocols. Combining monitoring and management objects of DEN within the bounds of object of DEN causes the need to increase of information messages transmission speed.

It is noted, that when creating information systems of DEN CS with a large number of monitoring and management objects it is expedient to use both the existing information support equipment and development of new ones. It should be noted that for the DEN CS information support different information support equipment are used, which complicates the process of their integration into one DEN CS.

The analysis showed that due to the coincidence of the topology of the DEN with the topology of the DEN CS information flows, as well as on the technical and economic indicators, it is expedient to construct information support systems using of the DEN 0.4...10 kV as a medium for information signals transmission.

However, existing approaches to building communication systems for DEN 0.4.. 10 kV CS do not fully meet the new requirements of the information support of the DEN CS regarding the speed and efficiency of the transmission. Therefore, there is a need for further development of approaches to building information transmission systems for DEN CS.

On the basis of the analysis of existing methods and means of signals transmission by DEN, it was found that it is expedient to use of spread spectrum (SS) signals as information signals for transmitting by DEN 0.4...10kV, which, in contrast to the existing signals, allows multichannel signal transmission, increase speed and noise immunity. But the limited frequency bandwidth that is suitable for transmitting signals by DEN requires the further development of the approaches to the formation of SS signals to the transmission conditions of the DEN 0.4...10kV.

In the second section, the analysis of the signals used for the transmission of DEN in the DEN CS information systems, including classical narrowband signals and modern wideband signals, was conducted.

In the spectra of signals for transmission by DEN, obtained by classical methods, 90% of the signal energy lies within the first spectrum tab. The rest of the energy is lost, which leads to distortion of the signal.

In order to reduce the part of the energy that goes beyond the first tab, a new method is proposed, which is to further signal transform using a Wave-wavelet function, which allowed to focus power of the signal in the band of transmission and to increase the efficiency of using frequency band when transmitting SS signals by DEN.

To estimate the influence of frequency characteristics of DEN 0.4 ... 10 kV on the process of signals propagation by DEN, an approach based on the correlation analysis between the transmitted and received signals is proposed.

Using the proposed approach, we obtained the results of the estimation of the influence of the phase-frequency characteristic and the amplitude-frequency characteristic of the DEN on the SS signals propagation process by DEN, the analysis of which showed its dependence on the nonlinearity of the amplitude-frequency characteristics and the phase-frequency characteristics of DEN.

The third section presents the results of an experimental study of the frequency characteristics of the DEN 0.4 ... 10 kV, which were carried out on the DEN 0.4...10 kV urban village Dikanka, and DEN department of the AE of the corps number 20 of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

The research was carried out to determine the complete input resistance of the DEN, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the DEN for a 0.4 kV network and the passage of signals from the 0.4 kV network to the 10 kV network.

A new method was proposed for the investigation of the phase-frequency characteristics that allows to research phase-frequency characteristics of DEN in the remoteness of transmission and reception points.

The developed method is based on the principle of measuring the relative phase shift between signals transmitted at different frequencies, which are phased at the transmission side. It allows us to determine the phase shift for discrete values of frequencies between frequencies that differ in two from each other in relation to the selected initial frequency, which allows us to obtain a relative phase-frequency characteristics of DEN.

In the fourth section analyzes analytical and simplified methods of calculating DEN as a medium for signals transmitting for frequency characteristics of DEN calculation.

An analysis of the approximate methods of DEN calculating as a medium of signal transmission has shown that they are based on the presented HF paths by DEN by two characteristics: the signal damping and the characteristic resistance of the path, which is not enough to evaluate the SS signal propagation process by DEN.

The exact method of calculating DEN as a medium for transmitting signals is a method based on DEN elements representation as lines with distributed parameters, but the use of this method is hindered by DEN elements parameters lack.

To solve the problem of DEN elements parameters determining, it is proposed to use the numerical solution of Maxwell equations by finite element method for DEN elements spatial models and verify the correctness of obtained results.

Key words: control systems, information networks, signaling, broadband signal, distribution network, amplitude-frequency characteristic, phase-frequency characteristic.



*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. Т.1. С. 66–69.

2. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Обработка широкополосных сигналов в информационно-управляющих системах на основе каналов передачи данных по РЭС 0,4...10кВ. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. Т.3. №2. С. 84–87.

3. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния амплитудно- и фазочастотных характеристик канала передачи данных по РЭС 0,4...20 кВ на основе широкополосных сигналов. *Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*. 2006. Т.6. С. 42–45.

4. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2007. Т.1. №2. С. 167–171.

5. Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Тимохін О. В. Автоматичне частотне розвантаження на основі аналізу швидкості зміни кута напруги. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2012. №2. С. 104–109.

6. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження енергосистем. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2013. №1. С. 39–43.

7. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2014. №4. С. 167–171.

8. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній си / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. №6. С. 129–135.

9. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генеру / Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О., Тимохін О. В. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №5. С. 69–73.

10. Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення. *Технічна електродинаміка*. 2015. №5. С. 55–58.

11. Тимохін О. В., Нестерко А. Б., Планіда А. О. Аналіз розподільчої електромережі 10кВ, як середовища передачі технологічної інформації в системах АСУ ТП: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. *"Політехніка"*. 2010. С. 70–73.

12. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Побудова коректуючих фільтрів для передачі інформації по розподільчим електричним мережам. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2015. С. 45–47.

13. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Технічні основи побудови фільтрів із заданими частотними характеристиками. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2016. С. 72–75.

14. Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Тимохін О. В. Особливості впровадження стандарту ІЕС61850 на підстанціях України: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. *"Політехніка"*. 2009. Т.1. С. 169–173.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

15. Яндульський А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *П'ята міжнародна науково-практична конференція "Комп'ютерні системи в*

*автоматизації виробничих процесів”, Тези доповідей. 20-23 травня 2007р., Хмельницький національний університет, Хмельницький – С.67.*

16. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ // *ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 22-24 жовтня 2013р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.125*

17. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Тези доповідей. 29 червня – 2 липня 2014р. Луцький національний технічний університет, Луцьк-Шацькі озера – С.212-213*

18. Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення. *Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». Тези доповідей. 9-12 червня 2015р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – видання на CD-диску*

19. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / Яндульський О.С., Тимохін О.В., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. *ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.66*

20. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О., Тимохін О.В. *ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 11-13 жовтня 2017 р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця.*

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень .....	15
Вступ.....	18
РОЗДІЛ 1. Стан та перспективи розвитку систем керування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ.....	25
1.1. Стан та особливості розподільних електричних мереж 0,4...110 кВ як об'єкта керування.....	25
1.2. Основні задачі, та проблеми керування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ .....	34
1.3. Інформаційне забезпечення як засіб підвищення ефективності систем керування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ.....	44
1.3.1 Особливості побудови інформаційного забезпечення систем керування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ .....	44
1.3.2 Методи та засоби передачі сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ .....	54
1.3.3 Широкополосні сигнали як основа систем передачі по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ.....	57
Висновки по розділу 1 .....	61
РОЗДІЛ 2. Підвищення ефективності передачі широкополосних сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ .....	63
2.1. Спектри інформаційних сигналів, що передаються по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ .....	63
2.2. Розробка методу формування сигналів з підвищеною ефективністю використання частотного спектру для передачі по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ .....	73
2.3. Оцінка впливу частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ на процес передачі широкополосних сигналів.....	78

Висновки по розділу 2 .....	86
РОЗДІЛ 3. Експериментальне дослідження частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища для передачі сигналів .....	87
3.1. Методика експериментального дослідження частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ .....	87
3.2. Результати дослідження частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10кВ .....	101
3.2.1 Аналіз результатів дослідження повного вхідного опору розподільних електричних мереж 0,4...10кВ .....	101
3.2.2 Дослідження рівнів передачі сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10кВ .....	105
3.2.3 Дослідження рівнів передачі сигналів по розподільній електричній мережі з рівня 0,4 кВ на рівень 10 кВ.....	109
3.2.4 Аналіз результатів дослідження фазочастотної характеристики розподільної електричної мережі 0,4 кВ.....	112
Висновки по розділу 3 .....	114
РОЗДІЛ 4. Розрахунок параметрів розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища передачі широкополосних сигналів та випробування засобів передачі інформаційних сигналів по ним.....	115
4.1. Аналіз методів моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища передачі широкополосних сигналів .....	115
4.1.1 Метод моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища на основі телеграфних рівняннях .....	115
4.1.2 Наближені методи моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища передачі сигналів .....	122

4.2. Розрахунок параметрів розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ на основі чисельного вирішення просторової задачі розподілу електромагнітних полів в елементах РЕМ.....	125
4.3. Розробка та впровадження пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ на основі широкополосних сигналів.....	131
4.3.1 Розробка основних вузлів пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ на основі широкополосних сигналів .....	131
4.3.2 Впровадження пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ у складі інтегрованої системи керування.....	135
Висновки по розділу 4 .....	137
Висновки .....	139
Список використаних джерел .....	141
Додатки.....	156

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CIM	– Common Information Model / Загальна інформаційна модель
DSSS	– Direct sequence spread spectrum / Метод прямої послідовності для розширення спектру
FHSS	– Frequency-hopping spread spectrum / Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти
GPRS	– General Packet Radio Service / Пакетний радіозв'язок загального користування
GSM	– Global System for Mobile Communications / Глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку
IEC	– International Electrotechnical Commission / Міжнародна електротехнічна комісія
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers / Інститут інженерів електротехніки та електроніки
ISO	– International Organization for Standardization / Міжнародна організація з стандартизації
OFDM	– Orthogonal frequency-division multiplexing / Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів
OSI	– Open systems interconnection basic reference model / Базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PDC	– Phasor data concentrator / Концентратор даних
PMU	– Phasor measurement unit / Пристрій вимірювання комплексної амплітуди
RISC	– Reduced instruction set compute / Комп'ютер із скороченим набором команд
SAIDI	– System Average Interruption Duration Index / Індекс середньої тривалості відключень в системі

UART	– Universal Asynchronous Receiver-Transmitter / Універсальний асинхронний приймач-передавач
USB	– Universal Serial Bus / Універсальна послідовна шина
АПВ	– Автоматичне повторне включення
АЧХ	– Амплітудно-частотна характеристика
БПС	– Блок перемноження сигналів
ВДЕ	– Відновлювальні джерела енергії
ВЕС	– Вітрова електростанція
ВЧ	– Високочастотний
ВЧЗ	– Високочастотний загороджувач
ГЗУ	– Групові замірні установки
ГС	– Генератор сигналів
ЕО	– Електронний осцилограф
ЗТП	– Закритий трансформаторний пункт
ІСК	– Інтегрована система керування
КЗ	– Канал зв'язку
КПД	– Канал передачі даних
КТП	– Комплектна трансформаторна підстанція
ЛЕП	– Лінія електропередач
ОЕС	– Об'єднана енергосистема
ПК	– Персональний комп'ютер
ПП	– Пристрій приєднання
ПС	– Підстанція
РЕМ	– Розподільна електрична мережа
РЗА	– Релейний захист та автоматика
РП	– Розподільний пункт
РПН	– Регулювання під напругою
СЕС	– Сонячна електростанція
СК	– Система керування
ТН	– Трансформатор напруги



ТС	– Трансформатор струму
ТФ	– Телефонний канал зв'язку
ФВЧ	– Фільтр верхніх частот
ФП	– Фільтр приєднання
ФЧХ	– Фазочастотна характеристика
ШПС	– Широкополосний сигнал

## ВСТУП

На сьогоднішньому етапі розвитку РЕМ 0,4...110 кВ гостро постає питання підвищення якості обслуговування споживачів, що пов'язане в першу чергу із зменшенням аварійного недовідпуску електроенергії, швидке відновлення живлення після аварій та підтримку режиму роботи РЕМ 0,4...110 кВ на економічно ефективному рівні. Разом із тим слід зазначити впровадження все більшої кількості відновлювальних джерел енергії в складі РЕМ 0,4...110 кВ, зокрема і малої потужності, а також суттєве зростання споживання електроенергії кінцевими споживачами.

Тому для ефективного керування такими РЕМ впроваджуються нові підходи, що ґрунтуються на максимальній поінформованості про генерацію, споживання та стан електричних мереж та устаткування для підвищення ефективності, надійності, економічності та стійкості РЕМ 0,4...110 кВ в процесі виробництва та розподілу електроенергії.

Враховуючи розподіленість вузлів генерації та споживання РЕМ 0,4...110 кВ, важливими стають питання інформаційного забезпечення систем управління РЕМ 0,4...110 кВ, що забезпечать об'єднання розподілених об'єктів РЕМ 0,4...110 кВ та засобів їх автоматизації в єдину систему керування.

При цьому слід зазначити, що всі об'єкти РЕМ 0,4...110 кВ є зв'язаними по електричним мережам, тому використання її в якості середовища для передачі інформаційних сигналів є доцільним і актуальним.

**Актуальність теми.** У відповідності до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. передбачається підвищення надійності та ефективності роботи розподільних електричних мереж (РЕМ) 0,4...10 кВ в умовах широкого впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

Для ефективного керування РЕМ впроваджуються нові підходи, що ґрунтуються на концепції «SmartGrid», які висувають нові вимоги до інформаційного забезпечення, основою якої є обмін інформацією між об'єктами електричних мереж, споживачів, відновлювальних та інших джерел енергії. Існуючі методи та засоби не в повній мірі забезпечують систему керування

необхідними об'ємам інформації з допустимими затримками та заданою достовірністю передачі даних в реальному часі, що ускладнює впровадження сучасних технологій керування РЕМ.

Особливості РЕМ 0,4...10 кВ як об'єкта керування, серед яких співпадіння топологій РЕМ та інформаційних потоків, відносно невеликі об'єми інформації про стан та режими об'єктів РЕМ, що передаються від значної кількості розосереджених об'єктів РЕМ, незначні відстані між ними, а також незадовільні техніко-економічні показники наявних засобів передачі, обумовлюють доцільність використання РЕМ як середовища для передачі інформаційних сигналів.

Використанню РЕМ 0,4...10 кВ як середовища передачі інформаційних сигналів присвячені науково-дослідні та дисертаційні роботи, що виконувались фахівцями Інституту Електродинаміки НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ООО «Науково-технічний центр «Енергов'язок», ОАО «НТЦ электроэнергетики», АО «Энергетический институт им. Г.М.Кржижановского», а також Лундського університету (Швеція), фірми Novell, компанії Echelon Corporation, університету Модені та Реджо-нель-Емілії, Наньянського технологічного університету, Римського університету «Ла Сапієнца», групи компаній HomePlug Alliance та ін. Основні результати виконаних робіт знайшли відображення в роботах Костенка М.В., Смірнова Б.В., Буслова Л.І., Шестопалова В.Н., Перельмана Л.М., Скриля В.Ф., Яндульського О.С., Хохлова Ю.В., Stephano Galli, Thomas Banwell, Lars Selander та ін.

Вирішення поставлених задач вимагає використання широкополосних сигналів (ШПС) в якості інформаційних сигналів для передачі даних по РЕМ. В той же час РЕМ не призначено для передачі ШПС, що обумовлює необхідність у подальшому вдосконаленні методів і засобів передачі інформаційних сигналів шляхом розробки методів формування ШПС із покращеними параметрами для передачі по РЕМ та дослідження властивостей РЕМ як середовища передачі ШПС. Це дозволить об'єднати в єдину інформаційну мережу більшу кількість

об'єктів керування РЕМ та підвищити швидкість передачі інформаційних сигналів, що підвищить ефективність інформаційного забезпечення систем керування РЕМ, що є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок з науковими програмами, планами та темами.** Дисертація виконана відповідно до планів наукових досліджень та господарських договорів кафедри Автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у тому числі «Розробка та впровадження інтегрованої системи управління груповими замірними установками ГЗУ» (№ держреєстрації 0101U000631), «Розробка та впровадження системи збору та передачі інформації від мікропроцесорних пристроїв релейного захисту для підстанції 500 кВ «Новодонбаська» (№601/352), «Розробка та впровадження автоматичного збору та передачі інформації із підстанцій 330/220/110 кВ «Луцьк-північна» від мікропроцесорних пристроїв РЗА та реєстратора аварійних процесів «Регіна» (№ держреєстрації 0103U005818)

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності інформаційного забезпечення СК РЕМ шляхом використання РЕМ як середовища передачі інформаційних ШПС із покращеними характеристиками та у визначенні умов розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Провести аналіз РЕМ як об'єкта керування та обґрунтувати використання РЕМ для передачі ШПС;
2. Розробити метод формування ШПС з покращеними характеристиками для передачі по РЕМ та оцінити вплив характеристик РЕМ 0,4...10 кВ на процес розповсюдження ШПС;
3. Провести експериментальне дослідження частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ;
4. Розробити підхід до розрахунку частотних характеристик елементів РЕМ 0,4...10 кВ;

5. Розробити засоби передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ як складової СК РЕМ.

*Об'єкт дослідження.* Процеси розповсюдження інформаційних сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ.

*Предмет дослідження.* Властивості розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ в діапазоні частот передачі ШПС, методи формування інформаційних сигналів, що передаються по РЕМ 0,4...10 кВ та методи розрахунку характеристик РЕМ 0,4...10 кВ.

**Методи дослідження.** В дисертації для вирішення задачі покращення характеристик ШПС, що передаються по РЕМ 0,4...10 кВ використано функція Wave-вейвлета. Для оцінки якості передачі сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ використано елементи кореляційного аналізу. При аналізі спектрів сигналів використано математичний апарат Фур'є аналізу. При аналізі РЕМ 0,4...10 кВ як середовища сигналів застосовувалися елементи теорії ліній із розподіленими параметрами. При розробці підходу до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами було використано рівняння Максвела, розв'язок яких здійснювався сертифікованому програмному комплексу розрахунку електричних та магнітних полів на основі метода скінчених елементів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Розроблено новий метод формування ШПС, який на відміну від існуючих полягає у застосуванні додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити енергію ШПС в полосі передачі та підвищити ефективність використання частотного діапазону при передачі ШПС по РЕМ.
2. Запропоновано підхід до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами, який на відміну від існуючих полягає у розв'язку рівнянь Максвела методом скінчених елементів для моделей елементів РЕМ на основі геометричного розташування, електричних і магнітних параметрів матеріалів складових елементів РЕМ.

3. Розроблено новий метод дослідження фазочастотних характеристик РЕМ, який на відміну від існуючих полягає в передачі зфазованих сигналів по РЕМ, що дозволяє проводити експериментальне визначення фазочастотних характеристик під напругою без створення зворотного каналу передачі сигналів.
4. Отримані нові характеристики РЕМ в умовах передачі ШПС, що дозволило розробити вимоги та рекомендації до застосування ШПС для передачі по РЕМ.

**Практичне значення отриманих результатів** роботи полягає в тому, що розроблений новий метод формування ШПС на основі додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції дозволив зосередити 99 % енергії ШПС в полосі передачі, що дозволило побудувати пристрої передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ з ефективним використанням частотного діапазону.

Розроблені методи формування ШПС та засоби інформаційного забезпечення СК РЕМ на основі передачі ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволяє забезпечити виконання задач керування в умовах впровадження технологій SmartGrid.

Запропонований підхід до розрахунку параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами, що може бути використано при проектуванні систем передачі інформаційних сигналів по РЕМ.

Отримані нові характеристики РЕМ України, що можуть бути використані при проектуванні нових систем передачі інформаційних сигналів по РЕМ по РЕМ 0,4...10 кВ.

Розроблений новий метод дослідження ФЧХ РЕМ з використанням зфазованих сигналів, що дозволяє побудувати систему корекції ФЧХ РЕМ у вузлах прийому ШПС в реальному часі, що покращить якість прийому ШПС.

Результати роботи використані при розробці інтегрованої системи управління установками ГЗУ НГВУ "Чернігівнафтогаз".

Результати роботи також використані у навчальному процесі кафедри автоматизації енергосистем в дисципліні «Основи та засоби передачі інформації», під час курсового та дипломного проектування.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі, розроблені автором самостійно. Формулювання мети роботи, вибір методологічних підходів, узагальнення результатів виконані безпосередньо дисертантом за участю наукового керівника. Робота [1] написана автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [2] – підхід до аналізу якості розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ на основі кореляційного аналізу; [3, 4] – підхід до аналізу та аналіз експериментальних результатів; [5] – отримання та аналіз нових закономірностей розповсюдження сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ в частотному діапазоні 1-1000 кГц; [6, 7] – підхід до побудови пристроїв корекції частотних характеристик РЕМ при використанні їх для передачі ШПС; [8, 9, 10, 11, 12] – аналіз систем керування РЕМ та вимоги до них в умовах впровадження технологій SmartGrid.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні теоретичні положення, результати та висновки по роботі доповідалися та обговорювалися на П'ятій міжнародній науково-практичній конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (м. Хмельницький, 2007), Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електротехніки та автоматики» (м.Київ, 2010), II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014 р.); на ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця 2013р.); V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». (Луцьк, 2014р.); Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». (м. Київ, 2015р.); ОКЕУ 2015

Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця, 2015р); ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. (м. Вінниця, 2017р);

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, в тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України (3 статті у виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International, РИНЦ).

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (136 найменування) і додатків. Основний зміст викладений на 155 сторінках друкованого тексту, містить 8 таблиць, 61 рисунок. Загальний обсяг дисертації – 171 сторінки.



## **РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ 0,4...110 КВ**

### **1.1. Стан та особливості розподільних електричних мереж 0,4...110 кВ як об'єкта керування**

РЕМ 0,4...10 кВ є останньою ланкою в системі забезпечення споживачів електроенергією і забезпечують зв'язок між кінцевими споживачами та районними з магістральними електричними мережами [13]. При цьому слід зауважити, що РЕМ 0,4...10 кВ є найбільш розгалужені мережі і мають найбільшу сумарну довжину, кількість вузлів та сумарну кількість устаткування серед електричних мереж інших класів напруг. Разом із тим слід зазначити, що дані електромережі відіграють не менш важливу роль в забезпеченні електропостачання споживачів чим і магістральні мережі більш високих класів напруг.

Станом на 2016 р. на основі відкритих джерел кількість районів електричних мереж 0,4...150 кВ підпорядкованих Міністерству енергетики та вугільної промисловості України становить 554 структурні підрозділи, які обслуговують 10676,499 км ліній 150 кВ, 36161,336 км ліній 110 кВ, 66356,847 км ліній 35 кВ, 347910,35 км ліній 10 кВ, 19128,713 км ліній 6 кВ та 431628 км ліній 0,4 кВ, які мають тенденцію до щорічного зростання загальної протяжності [13].

До складу РЕМ 0,4...10 кВ входять ділянки електричних мереж, кількість, розміри та межі яких визначаються з умов раціональної доцільності завантаження персоналу, об'ємів та періодичності проведення робіт. Відстані від центру до периферійних об'єктів РЕМ можуть сягати 30-40 км [14].

Кількість РЕМ ОЕС України перевищує 600 шт. До їх складу входять підстанції напругою 35 кВ і вище в чисельності 5376 шт., з яких двотрансформаторних – 2572 шт. Кількість трансформаторних пунктів 6...35/0,4 кВ – більше 200000 шт., а кількість фідерів напругою 6...20 кВ близько 30000 шт. [5, 15].

Аналіз технічного стану, надійності і рівня експлуатації РЕМ 0,4...110 кВ показав, що [14]:

- сучасний стан РЕМ характеризується тенденцією до збільшення пошкоджуваності основного електроустаткування у зв'язку із фізичним зношенням і моральним застаріванням, невідповідністю характеристик багатьох видів устаткування і конструкцій ліній електропередач фактичним умовам експлуатації;
- недостатні об'єми ремонтів і реконструкцій електричних мереж у зв'язку із недостатнім фінансуванням і матеріально-технічним забезпеченням;
- недостатній рівень забезпеченості засобами телемеханіки, автоматики, релейного захисту та зв'язку. Оснащення підстанцій сільськогосподарського призначення засобами інформаційної взаємодії зазвичай виконується на найпростішій апаратурі в об'ємі аварійно-попереджувальної телесигналізації, що не задовольняє вимогам надійності і ефективності диспетчерського управління. Більше 50% підстанцій не мають засобів інформаційного забезпечення взагалі;
- більше 10% РЕМ не має диспетчерських пунктів. Оснащеність диспетчерськими щитами при цьому становить близько 50%, а активними диспетчерськими щитами – менше 40%;
- продовжується експлуатація великої кількості застарілих пристроїв телемеханіки та автоматики.

Слід зазначити суттєве зношення основного устаткування, яке за різними оцінками складає 40 – 80 %, та повільний процес його заміни. Розподільні електричні мережі 6(10) кВ практично вичерпали свій резерв потужності та мають надзвичайно низький рівень автоматизації, дистанційного керування в РП(ТП) і їх вимикачі мають механічні (пружинні) приводи і не можуть бути обладнані засобами телекерування. При цьому спостерігається невпинне зростання територіальної щільності навантаження особливо у містах, яке,

наприклад, в центрі Києва сягає 9...10 МВт/км<sup>2</sup>, а в середньому по Києву 2,4 – 3,6 МВт/км<sup>2</sup> [13]. Це збільшує втрати електроенергії, перевантажує існуючі мережі, збільшує кількість аварій і як наслідок – аварійний недовідпуск електроенергії.

Для визначення топологічних особливостей РЕМ України, проведено статистичний аналіз типових РЕМ 10 кВ, серед яких РЕМ м. Біла Церква, с.м.т. Диканька та Білоцерківського району. Вихідні дані отримані від програмного комплексу РАО ТП з уточненням окремих даних по наявних схемах окремих ділянок РЕМ.

Обробка проводилася у відповідності з [16, 17] та застосування математичного програмного комплексу StatSoft Statistica 10 і включала визначення закону розподілення та перевірку отриманого закону розподілення за критерієм  $\chi^2$ .

Статистичний розподіл довжин типових ліній міських РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.1.

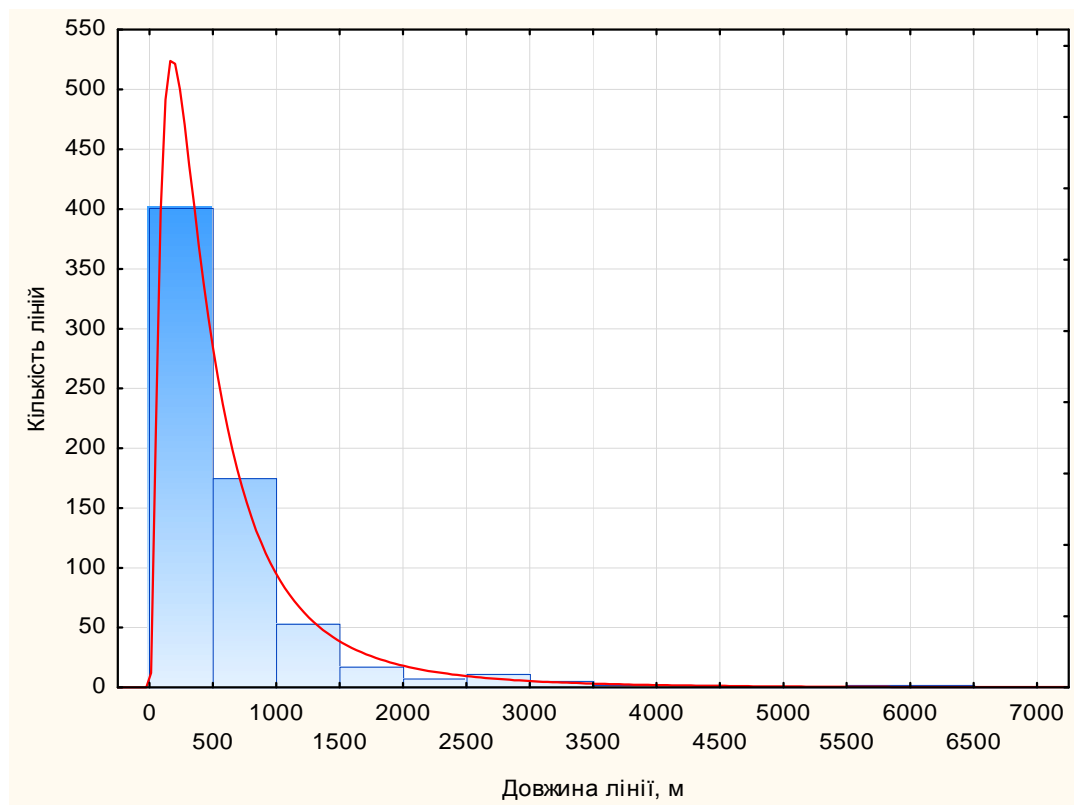


Рисунок 1.1 – Статистичний розподіл довжин типових ліній міських РЕМ 10 кВ

Встановлено, що розподіл довжин типових ліній міських РЕМ 10 кВ є логнормальним із параметрами  $m=6,052$  та  $s=0,931$ . Критерій  $c^2$  для отриманого розподілу становить  $c^2=10,74$ . Для рівня істотності 0,05 та скорегованих степенів свободи – 5 критичний  $c^2_{\text{крит}}=11,1$ , що більше від отриманого і підтверджує правильність обрання розподілу.

Статистичний розподіл поперечних перетинів типових ліній міських РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.2.

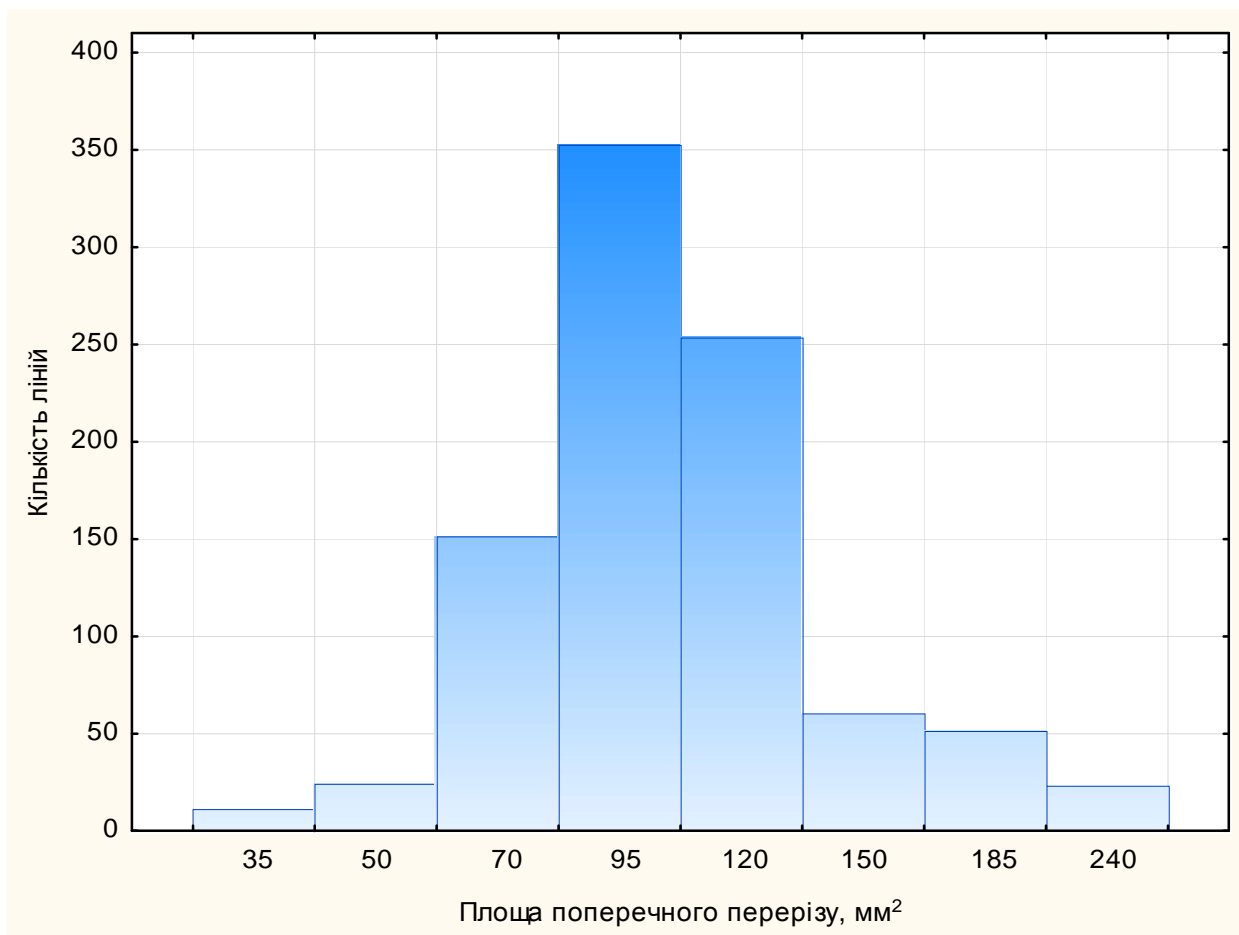


Рисунок 1.2 – Статистичний розподіл поперечних перетинів типових ліній міських РЕМ 10 кВ

Для отриманого розподілу не вдалося встановити закон статистичного розподілу, але аналіз отриманих даних показав, що більше 80% всіх ліній міських РЕМ 10 кВ мають площу поперечного перерізу в межах 70-95 мм².

Статистичний розподіл кількості приєднань на одне ТП або РП типових міських РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.3.

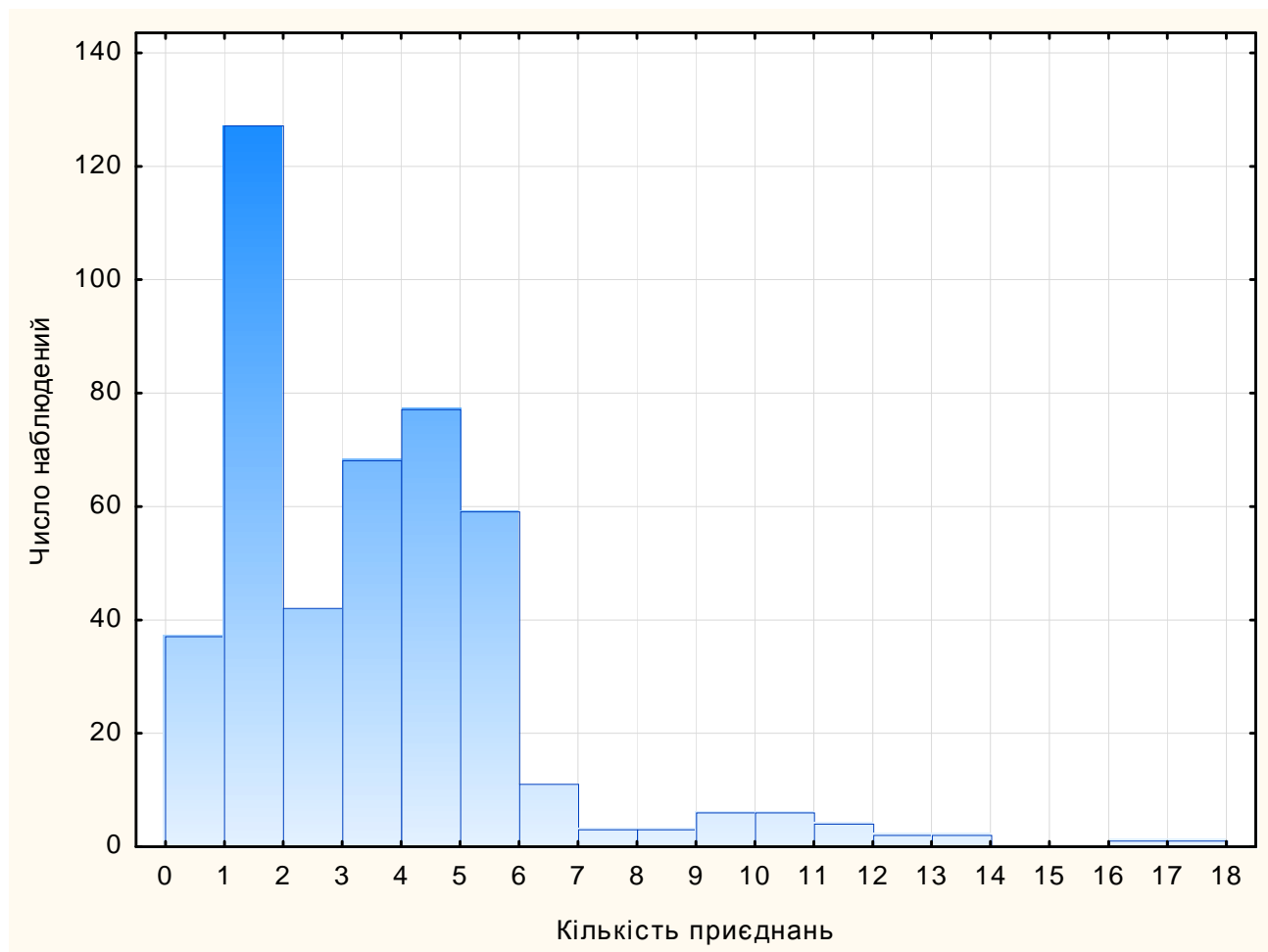


Рисунок 1.3 – Статистичний розподіл кількості приєднань ТП та РП типових міських РЕМ 10 кВ

Для отриманого розподілу також не вдалося встановити закон статистичного розподілу, але аналіз отриманих даних показав, що максимальна кількість приєднань сягає 18, але більше 90% всіх ТП та РП типових РЕМ 10 кВ мають до 6 приєднань.

Статистичний розподіл довжин типових ліній районних РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.4.

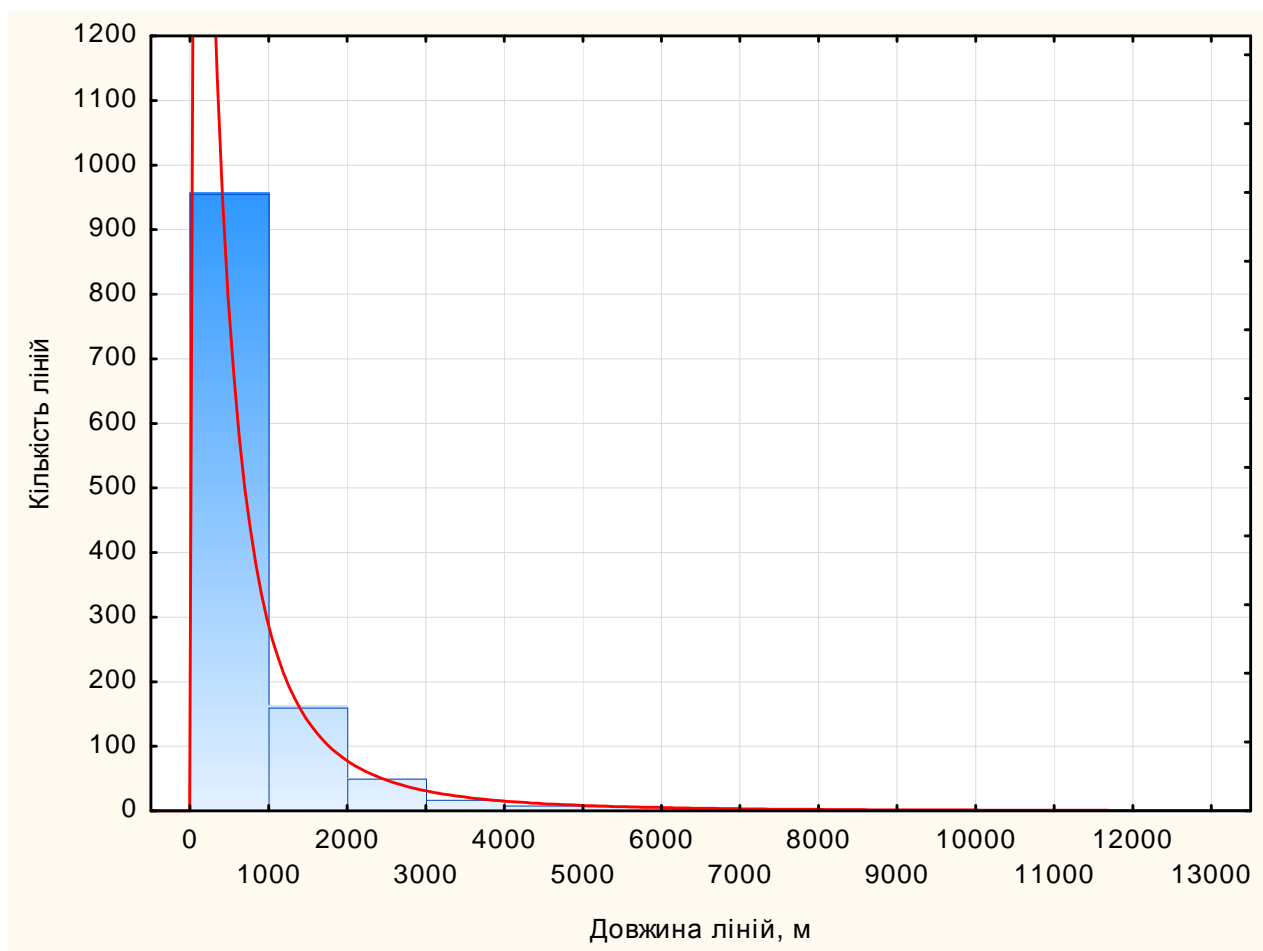


Рисунок 1.4 – Статистичний розподіл довжин типових ліній районних РЕМ 10 кВ

Встановлено, що розподіл довжин типових ліній районних РЕМ 10 кВ є логнормальним із параметрами  $m=5,95$  та  $s=1,211$ . Критерій  $c^2$  для отриманого розподілу становить  $c^2=12,167$ . Для рівня істотності 0,05 та скорегованих степенів свободи – 6 критичний  $c_{крит}^2=12,6$ , що більше від отриманого і підтверджує правильність обрання розподілу.

Статистичний розподіл поперечних перетинів типових ліній районних РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.5.

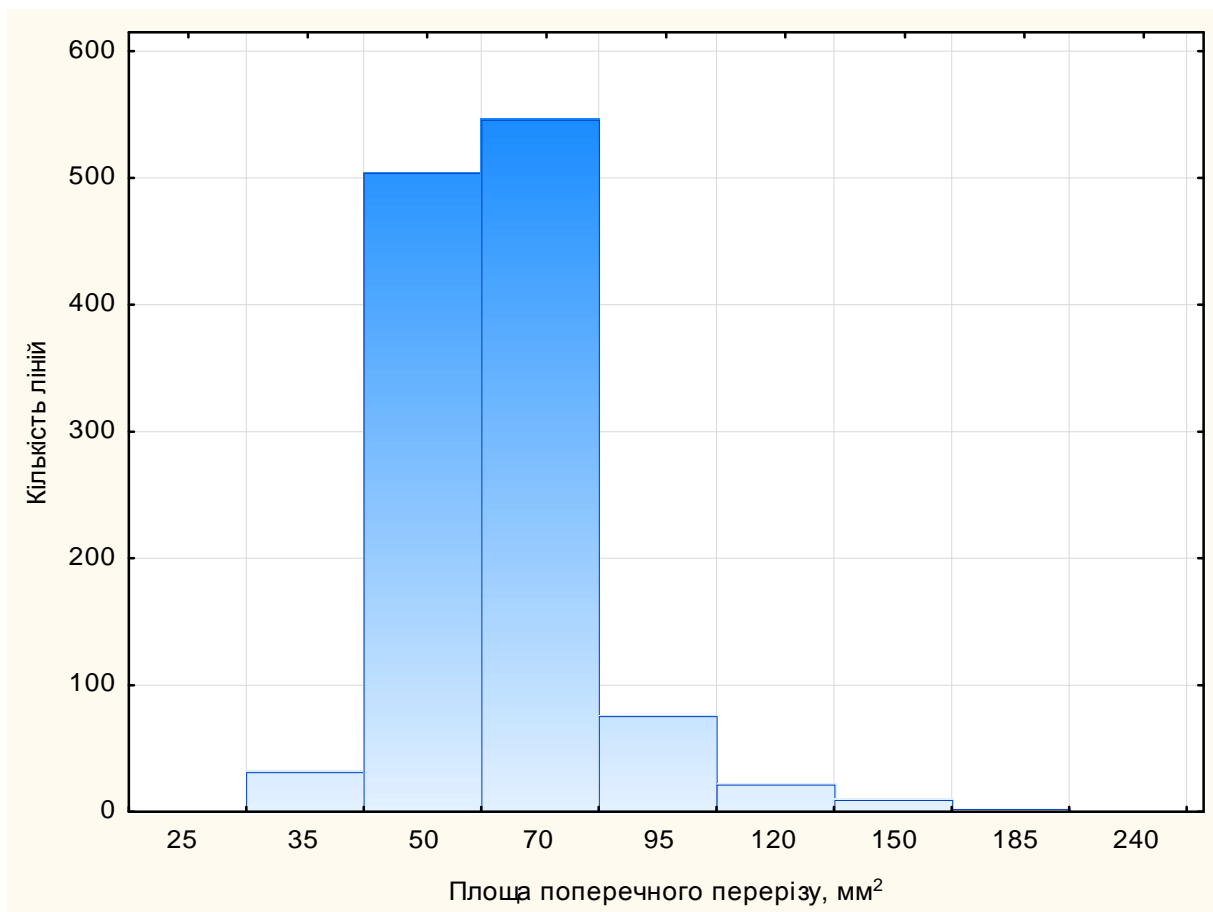


Рисунок 1.5 – Статистичний розподіл поперечних перетинів типових ліній районних РЕМ 10 кВ

Для отриманого розподілу не вдалося встановити закон статистичного розподілу, але аналіз отриманих даних показав, що більше 85% всіх ліній районних РЕМ 10 кВ мають площу поперечного перерізу 50 мм<sup>2</sup> та 70 мм<sup>2</sup>.

Статистичний розподіл кількості приєднань на одне ТП або РП типових міських РЕМ 10 кВ представлено на рис. 1.6.

Для отриманого розподілу також не вдалося встановити закон статистичного розподілу, але аналіз отриманих даних показав, що кількість приєднань сягає 30, але більше 80% всіх ТП та РП типових РЕМ 10 кВ мають до 1 або 2 приєднання.

У відповідності з «Нова енергетична стратегія України: безпека, енергоефективність, конкуренція» [18] впровадження SmartGrid технологій передбачає побудову та підключення до РЕМ відновлювальних джерел енергії, серед яких основними є сонячні та вітрові електростанції.

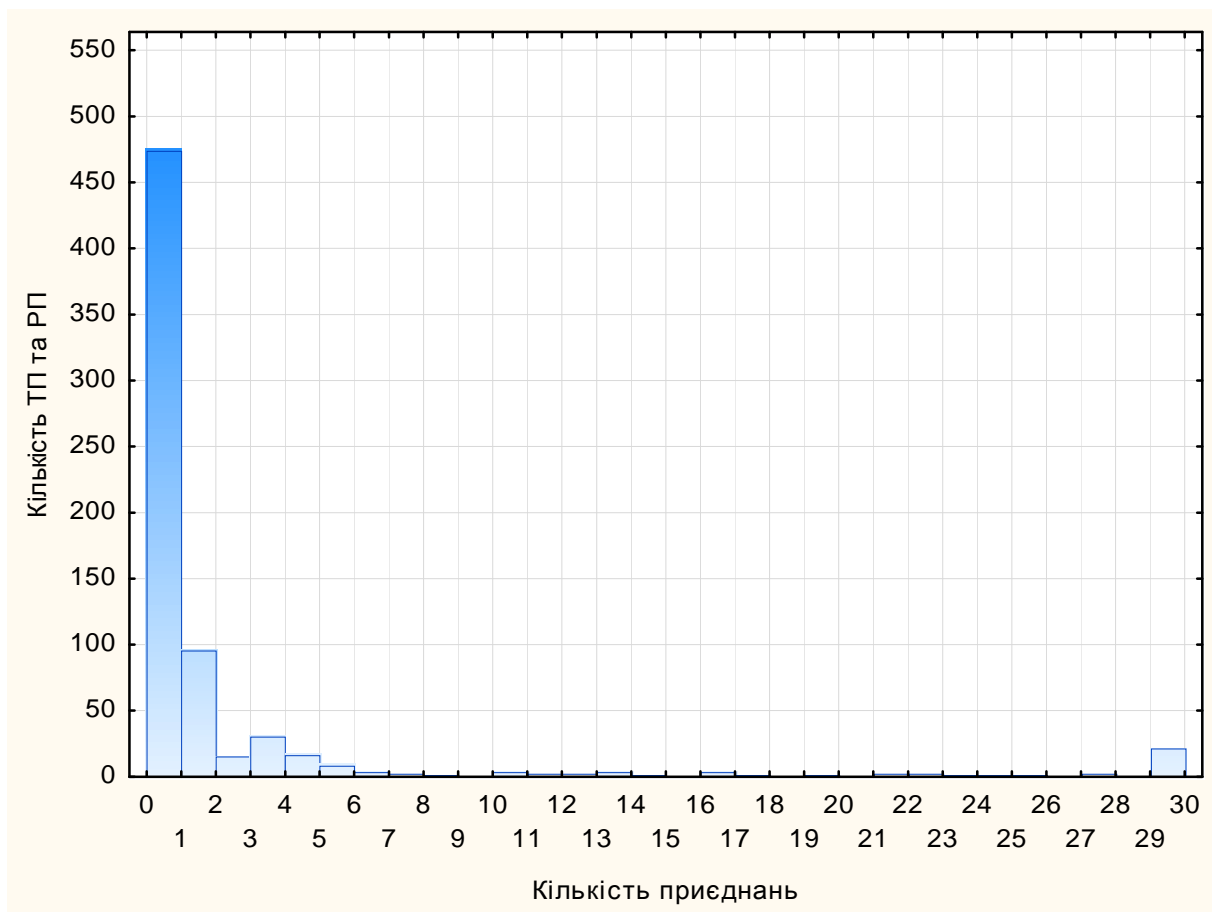


Рисунок 1.6 – Статистичний розподіл кількості приєднань ТП та РП  
типових районних РЕМ 10 кВ

Приєднання СЕС та ВЕС до РЕМ виконується в залежності від їх потужності: до мережі 0,4 кВ при потужності СЕС та ВЕС до декількох десятків кВт, до мережі 6-10 кВ при потужності СЕС та ВЕС до декількох сотень кВт, до мережі 35-110 кВ при потужності СЕС та ВЕС до декількох десятків МВт [5, 13]. Безумовно на вибір конкретного місця приєднання впливають і інші фактори.

Поява розосереджених по території і класам напруг джерел ВДЕ в РЕМ обумовлюють перерозподіл потоків потужності електроенергії, зміну напруги на об'єктах РЕМ та появу в залежності від режиму споживання і генерації двонаправлених потоків енергії (рис. 1.7).

Крім того, в аварійних ситуаціях при відключенні живлячих підстанцій, можлива робота ВДЕ на виділених споживачів в ізолюваному режимі [19].

Збільшення частки ВДЕ в складі генеруючих потужностей, що має місце в останні роки [19], приводить до зменшення інерційності ОЕС України, що



впливає на стійкість ОЕС України та обумовлює необхідність в додаткових засобах моніторингу режимів та демпфування низькочастотних коливань потужності в ОЕС України [20].

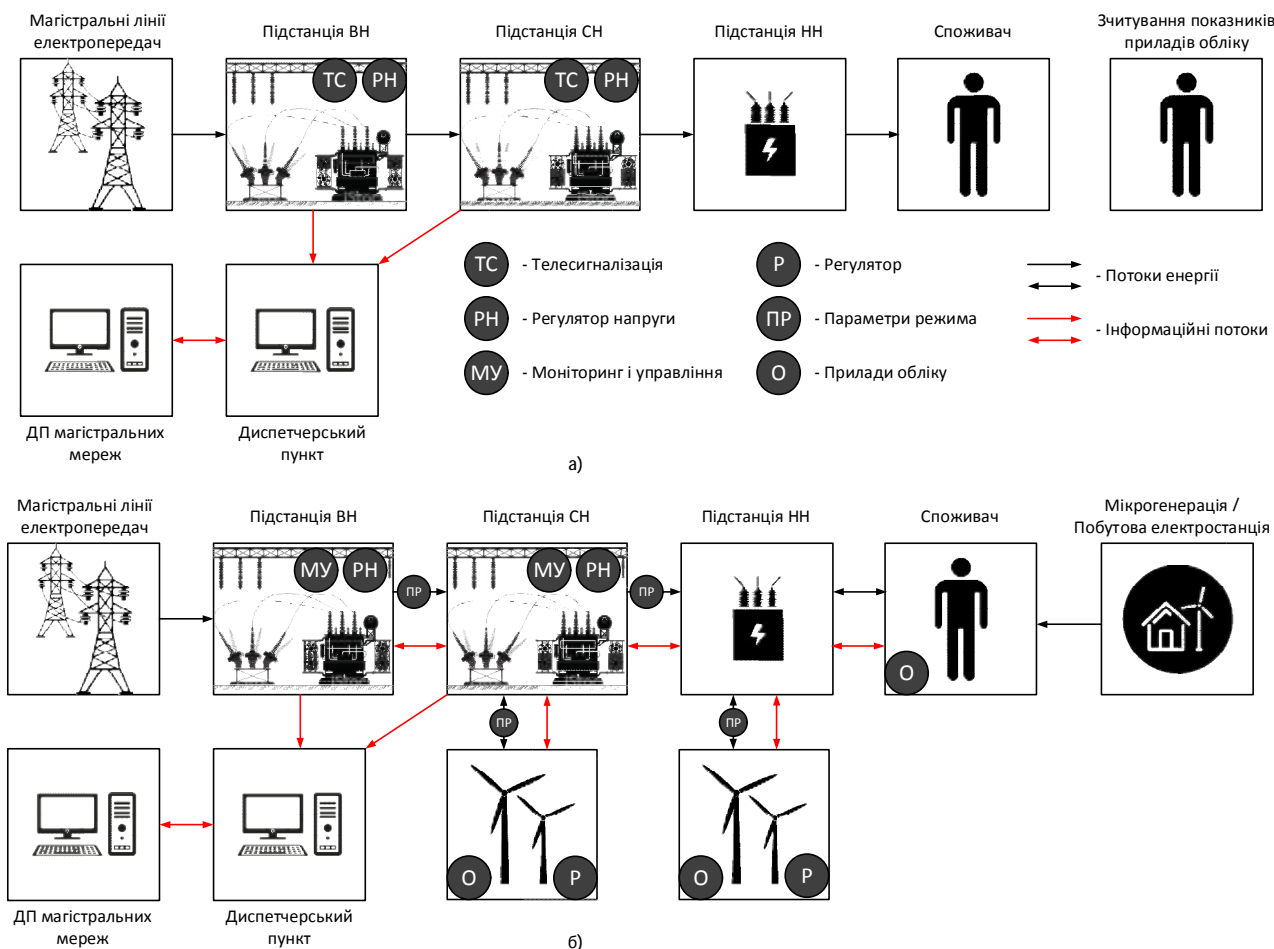


Рисунок 1.7 – Потіки інформації та енергії в РЕМ 0,4...110 кВ.

а) Традиційних РЕМ 0,4...110 кВ б) РЕМ 0,4...110 кВ із використанням технологій SmartGrid

Також слід зазначити, що останнім часом особливу увагу приділяють якості надання послуг з передачі та постачання електроенергії. В якості показників використовують міжнародно визнані індекси середньої тривалості відключень (SAIDI) [13, 21, 22].

Найближчим часом деякі компанії планують впровадження стимулюючого регулювання, для яких цільовий показник якості SAIDI для міст становитиме 150 хв., а для сільської місцевості – 300 хв. Аналіз показників якості SAIDI для підприємств України показує значне перевищення заявлених нормативних

показників. Так тривалість незапланованих перерв у електропостачанні споживачів України становить від 580 хв. до 870 хв., а в деяких несприятливих умовах сягає декількох діб, в той час як для країн Європи SAIDI не перевищує 104 хв. [13].

На сьогоднішній день НКРЕКП та Міністерство енергетики та вугільної промисловості України зобов'язали ліцензіатів (обленерго) розробити програми впровадження засобів інформаційного забезпечення на ПС та РП з метою забезпечення отримання достовірних даних щодо електропостачання споживачів та підняття рівня автоматизації РЕМ [13].

## **1.2. Основні задачі, та проблеми керування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ**

Аналіз РЕМ передбачає розгляд технологічних задач керування, оцінку ефективності їх вирішення та відповідності тенденціям розвитку електроенергетики [10, 11, 12, 23]. Одним з основних напрямків розвитку на даний момент є інтелектуалізація РЕМ на основі використання SmartGrid технологій [24].

Слід відзначити, що використання SmartGrid технологій викликане зростаючими вимогами до СК РЕМ, що обумовлене впровадженням розосереджених джерел енергії в РЕМ, обмеженням централізованого електропостачання, зростанням обсягів споживання та змінами у структурі навантаження [19]. Разом із тим суттєвий прогрес в розвитку мікропроцесорних пристроїв автоматики дозволяє побудову більш складних та більш оптимальних алгоритмів керування для забезпечення більш ефективного функціонування РЕМ.

Як встановлено в розділі 1.1 при виробництві та передачі енергії по РЕМ переходять від централізованого підходу до децентралізованого підходу із змінною направленістю потоків енергії, для керування якими необхідні інформаційні зв'язки між розподіленими об'єктами генерації і споживачами. Побудова такого підходу потребує автоматизацію об'єктів РЕМ та побудову

інформаційної мережі паралельних енергетичних потоків, що передаються по РЕМ. Зокрема такий підхід покладений в основу технологій SmartGrid [12, 24].

Підхід в побудові СК із використанням SmartGrid технологій полягає в побудові РЕМ в тісній інтеграції сучасного електротехнічного обладнання із засобами автоматики, системами із розподіленою генерацією, що пов'язані єдиною інформаційною мережею [11, 24, 25].

Деякі особливості побудов СК традиційних РЕМ та SmartGrid РЕМ представлено в табл. 1.1 [24, 26].

Таблиця 1.1 – Особливості СК традиційних РЕМ і SmartGrid РЕМ

Традиційні РЕМ	SmartGrid РЕМ
1	2
Електромеханічні/цифрові локальні засоби автоматики	Цифрові засоби автоматики із можливістю обміну інформацією
Однонаправлений обмін даними	Двонаправлений обмін даними
Централізована генерація	Централізована і розподілена генерація із відновлювальними джерелами енергії
Ієрархічна, розімкнена топологія	Гнучка топологія мереж, вузлів генерації споживання і т.д.
Невелика кількість джерел інформації	Максимальна інформатизація об'єктів мережі
Без засобів діагностики	Із засобами самодіагностики
Ручний контроль/тестування	Дистанційний контроль/тестування
Обмежена керованість	Максимальна керованість
Обмеженість користувачів в виборі режимів роботи	Велика гнучкість користувачів в виборі режимів роботи
Статична топологія із обмеженою зміною в ручному режимі	Динамічна топологія із розширеним набором топологій, що змінюється в автоматичному режимі засобами автоматики в режимі реального часу

Ці особливості обумовлюють появою нових складових в структурі СК РЕМ, яка у вигляді ієрархічної моделі представлені на рис. 1.8 [26].



Рисунок 1.8 – Ієрархічна структура складових СК РЕМ на основі SmartGrid технологій

Структура складових СК РЕМ із використанням SmartGrid технологій, що представлена на рис. 1.8 містить окрему складову телекомунікаційної інфраструктури, яка лежить в основі побудови всієї СК РЕМ на основі SmartGrid технологій.

Тому майбутнє СК РЕМ із використанням SmartGrid технологій обумовлює вільну інтеграцію складних компонентів, підсистем, мереж і сервісів під розподіленим керуванням інтелектуальних СК, що надають суттєву вигоду як постачальникам так і споживачам електроенергії [23, 24]. Цей підхід потребує значного зростання об'ємів даних, що передаються між вузлами РЕМ і відповідно, враховуючи територіальну розподіленість РЕМ, зростає роль систем передачі інформації, що забезпечать інформаційну взаємодію між компонентами, підсистемами і сервісами, що забезпечуватимуть роботу РЕМ.

Аналіз показав, що на теперішній час на СК РЕМ в загальному випадку покладено більш ніж 170 функціональних задач [8, 9, 15, 27], що підтримують взаємопов'язані процеси. Кожний з процесів керування є індивідуальним, оскільки передбачає досягнення визначених цілей керування. Разом з тим їх взаємопов'язаність спостерігається у інформаційному забезпеченні, оскільки

необхідне досягнення загальних кінцевих цілей. Загальна структура побудови сучасної СК РЕМ представлено на рис. 1.9.

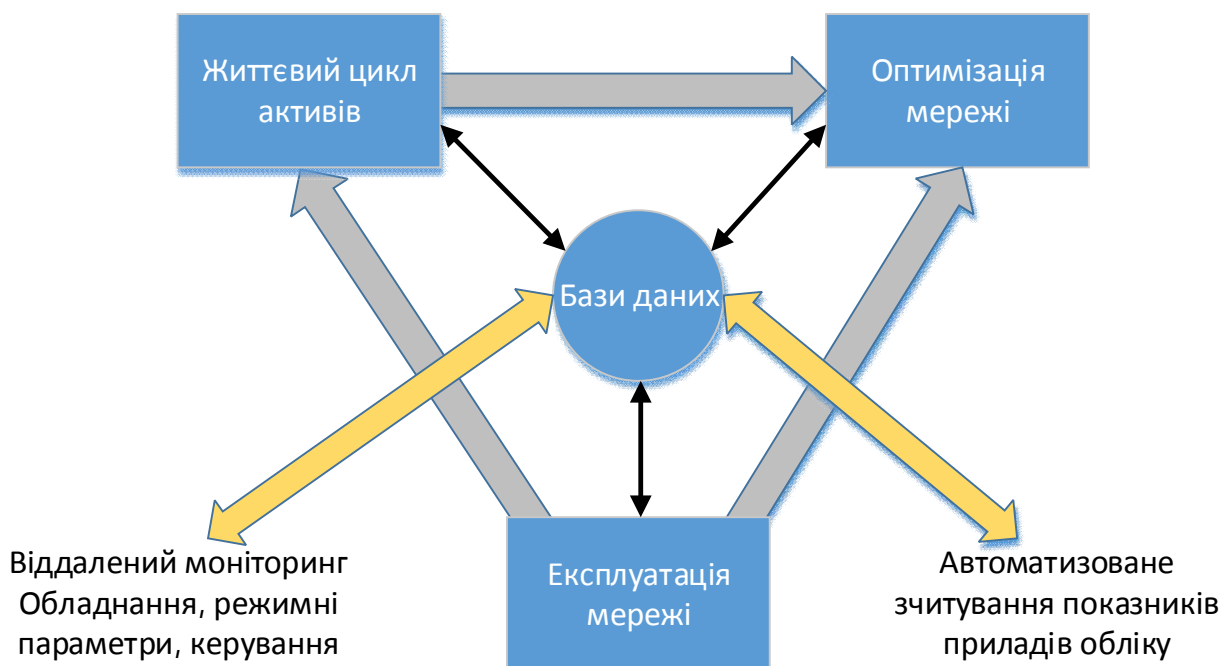


Рисунок 1.9 – Структура сучасної СК РЕМ

З цієї точки зору у відповідності з результатами проведеного аналізу, до процесів керування, що підтримуються засобами керування, можна віднести керування надійністю, ефективністю, якістю, генерацією ВДЕ, навантаженням, а також облік та керування інформаційними потоками [27]. Для підвищення ефективності керування існуючими РЕМ засоби керування повинні виконувати певні функції, основні з яких представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Функції засобів керування РЕМ

Функції	Область керування					
	Надійність	Ефективність	Якість	Навантаження	Облік	Інформація
1	2	3	4	5	6	7
1. Захист						
- визначення пошкоджень і ненормальних режимів шин, приєднань, трансформаторів;	X					X
- автоматичне відключення/переключення.	X					X
2. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ						
- повторне включення шин (секцій)	X	X				X
... відключення пошкодження	X					X
... обслуговування відновлення	X					X
... виділення перенавантаження	X	X				X
- ділення приєднання і повторне включення	X					X
... місце пошкодження	X					X

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7
... відключення пошкодження	X					X
... обслуговування відновлення	X	X				X
... зміна конфігурації		X				X
- зміна конфігурації та реактивної потужності		X	X			X
... регулювання напруги шин			X	X		X
... компенсація падіння напруги в лінії		X				X
... регулювання Q приєднання		X				
... балансування навантаження трансформаторів ПС		X				X
... регулювання реактивної потужності ПС		X				X
- балансування навантаження трансформатора ПС		X				X
... зменшення втрат в трансформаторі		X				X
... мінімізація перенавантажень		X				X
- частотне розвантаження	X					X
... дискретне відключення навантаження при зниженні частоти	X					
... відновлення живлення споживачів при відновленні частоти	X					
- включення резервного живлення	X					X

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7
... визначення відсутності напруги	X					
... проведення перемикачів	X					
- діагностика силового обладнання	X					X
3. КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ				X	X	X
- Вимірювання навантаження по РЕМ і основних споживачах-регуляторах				X	X	X
- виконання команд керування				X	X	X
4. ДИСПЕТЧЕРСЬКЕ (РУЧНЕ) КЕРУВАННЯ						
- інтерфейс ДП РЕМ/ІСК	X	X	X	X	X	X
... оперативні перемикачів						
... зміна уставок (РЗА, РН и т.д.)						
... контроль стану РЕМ, ІСК						
5. ОБЛІК ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ				X	X	X
- дистанційний облік					X	X
- дистанційне вимірювання Р и Q				X	X	X
- дистанційне програмування лічильників				X	X	X
- захист від крадіжок(підробок)					X	X



Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7
6. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (КЕРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЄЮ)	X	X	X	X	X	X
- збір та обробка даних						X
... розподілена система баз даних						X
... корегування даних (контроль даних)						X
... обробка інформації						X
... реєстрація стану РЕМ (аварійне і в операт. журналі)						X
- керування інформаційними потоками						X
- передача сигналів						
... по РЕМ 0,4, ... ,10 кВ	X	X	X	X	X	X
... по ВЧ-каналам по ПЛ 35, ... , 110 кВ	X	X	X	X	X	X
... по Радіорелейними-каналам	X	X	X	X	X	X
... по GSM/GPRS-каналам	X	X	X	X	X	X
... по Оптичолоконним-каналам	X	X	X	X	X	X
... по ТФ-каналам	X	X	X	X	X	X

В основі лежать відомі функції СК, такі як [15, 28, 29, 30]:

- захист обладнання РЕМ від пошкоджень та ненормальних режимів;
- автоматичне керування процесами повторного включення, ділення приєднань, регулювання напругою, реактивною потужністю, включення резервного живлення;
- збір, обробка та передача даних;
- керування навантаженням і облік електроенергії.

На поточний момент дані функції вирішуються шляхом застосування [15, 28, 29, 30]:

- захистів і відповідних засобів локальної (об'єктної) автоматики, як на мікропроцесорній, так і на електромеханічній основі;
- засобів телемеханіки в основному класичних принципів побудови з поодиноким застосуванням сучасних засобів у найбільш потужних або відповідальних споживачів;
- засобів обліку на основі переважно цифрових лічильників, але здебільшого без підключення до інформаційних мереж.

При цьому відсутність засобів інформаційного забезпечення і застаріла елементна база призводять до відсутності гнучкості даних засобів до змінних вимог керування і дублюванню ряду функцій при низькій ефективності їх вирішення, наприклад, вузькоспеціалізоване використання ліній зв'язку.

Суттєвий розвиток методів і засобів керування відбувся при впровадженні сучасних мікропроцесорних технологій, чому присвячені роботи інституту Електродинаміки НАН України [31, 32, 33], ООО «Науково-технічний центр «Енергов'язок» [34], ГП «Укренергоналадка та вимірювання» [35], НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [15, 36, 37] та інших організацій держави. Відомі також роботи і цьому напрямку закордонних установ та фірм, серед яких «Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики» [38], «Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского» [39], а також Лундського університету (Швеція) [40, 41],

фірми Novell [42, 43, 44], компанії Echelon Corporation [45], університету Модені та Реджо-нель-Емілії [42], Наньянського технологічного університету [46, 47], Римського університету «Ла Сапієнца» [44], групи компаній HomePlug Alliance [48], АВВ (Швеція) [49], Siemens (Німеччина) [50].

Основні результати виконаних досліджень і розробок знайшли в роботах Шидловського А.К. [51], Стогнія Б.С. [31, 32, 33, 33, 52], Кириленко А.В. [32, 33, 52, 53], Буслова Л.І. [54], Гінайло В.А. [35], Костенко М.В. [38], Лепорського В.Д. [55], Микуцького Г. В. [56], Мітюшкіна К.Г. [57], Перельмана Л.М. [38], Праховника А.В. [32], Скриля В.Ф. [37, 58], Тисленко В.В., Трач І.В. [59], Шестопалова В.Н. [54], Шкарина Ю.П. [38, 39, 60], Хохлова Ю.В. [36], Яндульського О.С. [2, 4, 9, 15], Lindell G. [41], Stephano Galli [43, 44], Thomas Banwell [43, 44], Lars Selander [40, 41], Gianaroli F. [42], Meng H. [47], Pang T. S. [46], Liu J. [61] та ін.

Так знайшли розвиток методи і засоби обліку при появі інтелектуальних електронних лічильників, автоматизованих систем обліку. Відомі також підходи і системи збору, обробки та передачі телемеханічної інформації нового покоління, реєстрації аварійних подій та діагностики силового обладнання, мікропроцесорні засоби захисту і автоматики [62, 63, 64, 65, 66, 67]. Дані методи і засоби не мають багатьох недоліків, що розглядались раніше. Однак, їх застосування потребує окремих засобів інформаційного забезпечення в кожній функціональній підсистемі, що на сьогоднішній день орієнтовано на використання Ethernet-сумісних мереж; не в повному обсязі забезпечує вирішення функціональних задач, особливо при роботі з побутовими споживачами.

Разом із тим слід зазначити, що зміни умов господарювання і розробка нових теоретичних основ та методів керування РЕМ, а також побудови СК РЕМ викликають необхідність у зміні підходів до їх побудови. Зокрема зміна підходів ґрунтується на тому, що окремий елемент або компонент СК РЕМ не є самостійним, а є елементом або компонентом, в якому вільні ресурси підпорядковуються досягненню загальної мети функціонування СК.

Такий підхід реалізується в рамках застосування SmartGrid технології в СК РЕМ, що вимагає інтеграції всіх засобів захисту, автоматики, регулювання та реєстрації в єдину інформаційну мережу і що реалізується за допомогою комунікаційних інтерфейсів. Таким чином можна сказати, що інформаційна мережа стає невід'ємною частиною СК РЕМ. Кількість об'єктів цієї інформаційної мережі значно збільшується, що призводить до збільшення потоків інформації та вимог до них.

### **1.3. Інформаційне забезпечення як засіб підвищення ефективності систем курування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ**

#### **1.3.1 Особливості побудови інформаційного забезпечення систем курування розподільними електричними мережами 0,4...110 кВ**

Існуючі системи збору, передачі інформації та керування в енергосистемах України широко розвинені в мережах 110 кВ і вище [15, 33, 52]. Аналіз функціональних задач разом із новими підходами в побудові СК РЕМ показав необхідність у встановленні таких систем і в РЕМ 0,4...110 кВ, причому перенос підходів до побудови таких систем потребує адаптації до умов функціонування РЕМ 0,4...110 кВ, які витікають з технологічних, оперативних і соціально-економічних особливостей РЕМ, до яких можна віднести [61, 68, 69]:

- при керуванні об'єктами РЕМ, особливо у перед аварійних режимах необхідна передача інформації від ДП до великої кількості об'єктів РЕМ з мінімальними затримками (режим циркулярного телекерування);
- при оцінці режиму роботи РЕМ, особливо при оцінці балансу потужності, виникає необхідність передачі інформації на ДП від великої кількості об'єктів, при цьому точність оцінки суттєво залежить від затримок при отриманні інформації;

- наявність різноманітних за об'ємом, інтенсивністю та пріоритетом потоків інформації (керування – невеликий об'єм з високим пріоритетом, облік – великий об'єм з низьким пріоритетом).

До технічно-економічних особливостей побудови СК РЕМ слід віднести також відсутність необхідної кількості інформаційних зв'язків з об'єктами РЕМ. Як в міських, так і в сільських РЕМ оперативні служби мають невелику кількість систем інформаційного забезпечення на основі телефонних каналів, на основі GPRS зв'язку (лише між основними об'єктами району) і радіорелейний зв'язок з обмеженою кількістю точок. Також як в міських, так і в сільських РЕМ практично відсутні інформаційні зв'язки з об'єктами 0,4...10 кВ (окрім найбільш потужних і відповідальних об'єктів). Разом із тим об'єкти РЕМ не однакові по своїй інформативності. Кількість інформації і її інтенсивність з об'єктів РЕМ в залежності від їх категорії та може змінюватися від одного до декількох десятків точок [70, 71, 72].

Засоби інформаційного забезпечення СК РЕМ можуть бути організовані із використанням трьох середовищ [73, 74, 75, 76]:

- засоби інформаційного забезпечення із використанням радіозв'язку (радіорелейний зв'язок, мобільний зв'язок);
- спеціалізовані провідні засоби інформаційного забезпечення (провідна телефонна мережа, оптоволоконні мережі або засоби на основі звитої пари);
- засоби інформаційного забезпечення на основі передачі інформаційних сигналів по РЕМ (повітряні і кабельні силові електричні лінії РЕМ напругою 0,4...10 кВ).

Обмежена кількість систем інформаційного забезпечення або їх фізичні обмеження у зв'язку з обмеженою полосою частот і рівномірністю загасання, або суттєва ціна за їх використання є обмежуючим і стримуючим фактором при впровадженні СК РЕМ 0,4...110 кВ.

Використання РЕМ як середовища передачі інформації також обумовлене із співпадінням напрямків інформаційних потоків СК РЕМ із напрямками передачі

електроенергії, що дає їм перевагу у порівнянні із класичними інформаційними мережами [15, 38, 74, 77, 78, 79], однак швидкий розвиток мікропроцесорних пристроїв і, як наслідок, підвищення ступеня автоматизації призводить до суттєвого зростання кількості та насиченості інформаційних потоків з об'єктами керування РЕМ, що потребують збільшення чисельності та пропускної здатності інформаційних мереж СК РЕМ, уніфікацію інтерфейсів, сумісне використання різноманітних систем інформаційного забезпечення, а відповідно уніфікація інформаційної моделі мереж.

Також при побудові СК РЕМ на ряду із підвищенням якості і кількості засобів інформаційного забезпечення і зростанням кількості інтелектуальних засобів автоматики на об'єктах РЕМ доцільним є вдосконалення принципів організації процесу керування РЕМ:

- підвищення інтелектуальності локальних СК, які здатні приймати необхідні рішення за умов слабого зв'язку з центром керування або за умов його відсутності;
- вся інформація, що передається в рамках керування технологічним процесом РЕМ необхідно ущільнювати спеціальними алгоритмами і іноді шифрувати для забезпечення конфіденційності в рамках використання ISO моделі побудови інформаційної мережі;
- вибирати структурно-алгоритмічну структуру СК РЕМ, де особливу увагу приділити побудові оптимальної інформаційної мережі;
- узгодження використання інформаційних ресурсів інформаційної мережі для забезпечення потреб локальних СК з метою реалізації принципу однократного опитування давачів і багатократного використання цих даних, у тому числі і через бази даних [9, 15, 33, 52, 68, 80].

Разом із тим слід зазначити, що засоби автоматики мають різне цільове призначення, виготовляються різними виробниками, мають різні засоби інформаційного забезпечення і при цьому є територіально розподіленими [81].

Тому інформаційне поєднання засобів автоматики в єдину АСУ РЕМ потребує інтеграції різних інформаційних мереж, що забезпечать їх об'єднання в єдину систему інформаційного забезпечення. Відповідно, перед засобами інформаційної забезпечення СК РЕМ постають нові вимоги, до яких слід віднести:

- стійкість до відмов окремих ліній зв'язку та мережевого устаткування інформаційної мережі;
- можливість комбінації в межах однієї інформаційної мережі різних засобів інформаційного забезпечення, що побудовані на різних протоколах взаємодії та фізичних середовищах передачі інформаційних сигналів;
- динамічне управління топологією інформаційної мережі та навантаженням окремих ліній зв'язку;
- робота в ізольованому режимі;
- підтримка роботи із обладнанням РЗА, регуляторами РПН, засобами діагностики силового обладнання та іншим автоматичним та автоматизованим устаткуванням;
- підтримка стандартних уніфікованих протоколів передачі даних;
- підтримка конвертації інформаційних потоків між протоколами та типами фізичних середовищ;
- мінімізація часу доставки інформації;
- підтримка передачі інформації з великої кількості об'єктів (ТП, РП, ПС);
- можливість гнучкого розширення кількості об'єктів та сумарної зміни швидкості передачі інформації в умовах змінної топології мережі.

На сьогоднішній день в СК як в енергосистемах так і в РЕМ, здійснюється обмін інформацією не тільки для інформаційної взаємодії між окремими пристроями релейного захисту та автоматики, а й для передачі даних між об'єктами енергосистеми та диспетчерським центром.





15 (RS-232)/1200 (RS-485) м. Причому основним недоліком даних мереж була не тільки невелика швидкість і відстань, а й принцип передачі ведучий-ведений, що накладало обмеження на мережу у вигляді необхідності встановлення «головного» об'єкта мережі за рахунок неможливості вирішення колізій на лінії при одночасній передачі [83, 84].

Канальний і прикладний рівні реалізовувались в межах комунікаційних протоколів, таких як ModBUS, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-103, DNP3, при цьому вони також регламентували і фізичний рівень OSI моделі, який вони підтримували [85, 86, 87, 88, 89, 90].

ModBUS – відкритий комунікаційний протокол на основі архітектури ведучий-ведений, що набув дуже широкого розповсюдження як в засобах автоматики, в електроенергетиці, так і в інших галузях промисловості. До особливостей протоколу слід віднести можливість адресації пристроїв, передачу груп даних в межах одного відправлення, контроль помилок відправлення. Функціонал протоколу поділено на функції, кожна з яких дозволяє отримати певну інформацію. До недоліків протоколу слід віднести його ручне конфігурування на сторонах передавача і приймача, можливість передачі даних двох типів (група бітів і група байтів), неможливість ініціації передачі від підпорядкованого пристрою, неможливість перевірки обриву зв'язку підпорядкованим пристроєм при передачі, можливість зчитування групи значень тільки таких, що поряд розташовані [86, 91].

IEC 60870-5-101/103 – протоколи телемеханіки, що призначені для передачі інформації в системах СК РЕМ по архітектурі «клієнт-сервер». Протоколи не передбачають наявності семантичної моделі даних. До переваг слід віднести можливість передачі спорадичної інформації. В основу протоколів покладений принцип обміну таблицями сигналів, причому дані, якими здійснюється обмін є фіксований. Але слід зауважити, що протоколи не передбачають передачу сигналів реального часу. Використання протоколами фізичного рівня на основі інтерфейсів RS-232/485 також свідчить про низку швидкість передачі даних і можливість організації тільки однорангових мереж [87, 92].

DNP3 – протокол телемеханіки, який охоплює три рівні моделі OSI: прикладний, каналний і фізичний. Мало розповсюджений на території України. Особливістю протоколу є можливість передачі даних від веденого пристрою до ведучого і між веденими пристроями. В основу протоколу покладений принцип передачі таблиці значень, причому для оптимізації використання ресурсів мережі ведеться передача не всієї таблиці, а лише її зміненої частини. Важливою особливістю протоколу є спроба об'єктного опису моделі даних і незалежність об'єктів від повідомлень, що передаються. Для опису структури даних використовується xml-формат [85, 90, 92].

Слід зазначити, що протоколи ModBUS, IEC 60870-5-101/103, DNP3 і досі використовуються в СК РЕМ, хоча для інтеграції в сучасні СК при модернізації часто виникає необхідність в конвертації їх в більш сучасні протоколи.

З розвитком технологій Ethernet, з широке розповсюдження отримало сімейство протоколів TCP/IP, які реалізують декілька рівнів моделі OSI. Програмні комплекси і апаратні засоби РЗА почали орієнтуватися на використання даного сімейства протоколів, як основу інформаційної взаємодії. І на сьогоднішній день сімейство протоколів TCP/IP є основою побудови інформаційної взаємодії сучасних засобів РЗА.

Слід зазначити, що сімейство протоколів TCP/IP, хоч і реалізовано у відповідності до ідеології OSI моделі, але не відповідає їй у повній мірі [93]. Зокрема невідповідність полягає в іншому діленні протоколів на рівні, хоча змістовне наповнення рівнів залишається незмінним (рис. 1.11).

Орієнтація на сімейство протоколів TCP/IP для інформаційної взаємодії СК РЕМ призвело до адаптації існуючих протоколів інформаційної взаємодії СК РЕМ до роботи на базі сімейства протоколів TCP/IP. Так з'явився протокол ModBUS TCP, який є майже повним аналогом ModBUS, але пристосованим до роботи на основі TCP/IP. На базі IEC 60870-5-101/103 з'явився протокол IEC 60870-5-104, який працює на базі TCP/IP протоколу і є основним протоколом передачі даних з підстанцій на диспетчерський пункт. Протокол DNP3 був адаптований до роботи на базі протоколів TCP/IP [92].

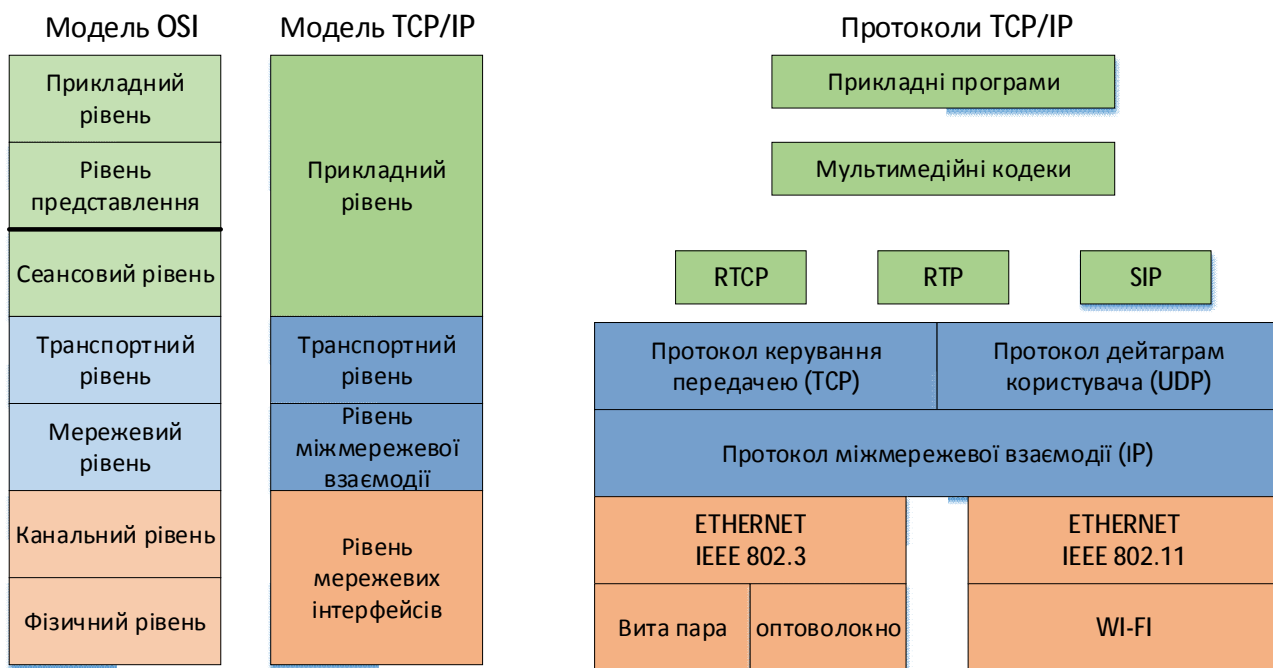


Рисунок 1.11 – Рівні моделі OSI і TCP/IP

Поряд із цими протоколами на сьогоднішній день впроваджуються і нові протоколи, в яких усунені недоліки існуючих протоколів, або вони покликані вирішувати нові задачі інформаційної взаємодії СК РЕМ, зокрема протокол IEEE C37.118, що розроблявся як протокол реального часу для інформаційної взаємодії реєстраторів аварійних подій та пристроїв вимірювання комплексної амплітуди (PMU) до концентраторів даних (PDC). Слід зазначити, що протокол IEEE C37.118 залишає можливість адаптації його і до більш старих протоколів фізичного рівня, таких як RS-232/485 за неможливості використання TCP/IP [94].

Але найбільш сучасним протоколом інформаційної взаємодії між засобами автоматики СК РЕМ на сьогоднішній день є протокол IEC 61850, який базується на сімействі протоколів TCP/IP, що дозволяє йому працювати у всіх мережах, що підтримують сімейство протоколів TCP/IP. Протокол передбачає ініціативу передачі інформації, як від пристроїв автоматики до центрів управління СК, так і навпаки, а також забезпечує обмін інформацією між пристроями автоматики без участі центру управління. Причому слід зауважити, що такий обмін, який отримав назву горизонтальних зв'язків, передбачає максимально швидку передачу, максимально наближену до реального часу. Також стандартом

регламентовано іменування адрес змінних на основі CIM-моделей, що уніфікує процес іменування споріднених величин в різних пристроях, а також можливість доступу до моделі даних пристрою в реальному часі, що значно спрощує процес конфігурування СК [95]. Комунікаційна модель IEC 61850 з прив'язкою до OSI модель представлена на рис. 1.12.

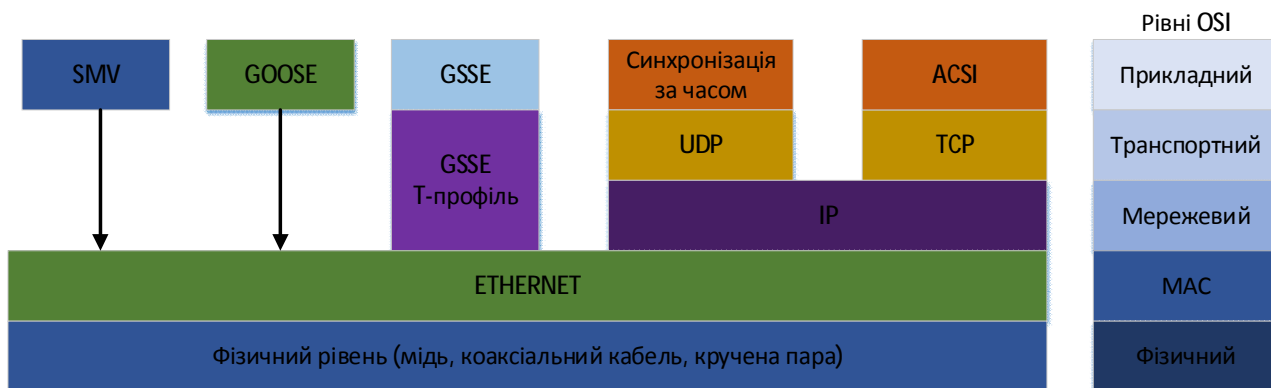


Рисунок 1.12 – Комунікаційна модель IEC 61850

В загальному випадку при побудові інформаційної мережі СК РЕМ необхідне вирішення трьох основних задач:

1. Вибір елементів мережі (ліній зв'язку, каналоутворюючої апаратури, центрів комутації мережі і т.д.);
2. Вибір раціональної структури мережі, що забезпечує оптимальне використання оптимальної кількості і місцезнаходження каналоутворюючої апаратури, а також оптимальну структуру об'єктів мережі;
3. Розробка оптимального алгоритму функціонування мережі, що забезпечує передачу інформації із заданими часовими і імовірнісними характеристиками.

Сучасний підхід, що побудований на використанні TCP/IP сумісних мереж дозволяє досить гнучко підходити до вирішення цих задач за рахунок гнучкості закладеної в основу мереж TCP/IP.

Причому слід зазначити, що фізичний рівень моделі OSI в реалізації TCP/IP регламентує можливість роботи мережі по Ethernet та оптоволоконним кабелям, але не обмежується ними, що дозволяє побудувати фізичний рівень і на інших

фізичних середовищах, зокрема радіоканалах, що широко використовується в системах інформаційного забезпечення СК РЕМ.

Раніше вказувалось, що в загальному випадку можливо використання трьох середовищ для побудови засобів інформаційного забезпечення СК РЕМ, однак проведене співставлення їх показало, що за техніко-економічними показниками використання РЕМ 0,4...35 кВ у якості середовища для передачі сигналів є найбільш виправданою. При цьому РЕМ як середовище передачі сигналів накладає певні додаткові обмеження на розповсюдження інформаційних сигналів, зокрема наявність декількох ступенів трансформації, змінна топологія мережі, підвищений рівень завад та суттєвий рівень загасання, особливо із зростанням частоти сигналів. Інші середовища передачі сигналів за умов використання відповідної каналоутворюючої апаратури можуть використовуватися в СК РЕМ як альтернативні або паралельні (резервні) маршрути.

Слід зауважити, що сучасні підходи до побудови засобів інформаційного забезпечення на основі РЕМ поділилися на внутрішньо- (indoor) і зовнішньобудинкові (outdoor). Особливого розвитку набули саме засоби на основі внутрішньобудинкових мереж як альтернатива для засобів інформаційного забезпечення на основі Ethernet та Wi-Fi і орієнтовані на використання широкополосних сигналів (ШПС) на високих частотах (до 86 МГц) [96]. Такі частоти не дозволяють передавати сигнали по РЕМ на відстані більше декількох сотень (а в деяких випадках і десятків метрів) у зв'язку із суттєвим загасанням сигналів із зростанням частоти [38, 79, 97, 98].

Для інформаційного забезпечення СК РЕМ більш актуальними є саме зовнішньобудинкові засоби інформаційного забезпечення на основі передачі інформаційних сигналів по РЕМ, які не набули широкого розповсюдження і дослідження в цьому напрямку на поточний момент спрямовані саме в дослідженні характеристик РЕМ як середовища для передачі сигналів [43, 44, 98, 99], при цьому використання саме ШПС в якості сигналів для передачі по РЕМ

дозволяє більш ефективно використовувати РЕМ як середовища розповсюдження сигналів.

### 1.3.2 Методи та засоби передачі сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ

Аналіз робіт [15, 38, 39, 56, 79] присвячених передачі сигналів по РЕМ показав, що методи можна розділити на два основних типи: методи на основі частотного ущільнення РЕМ та методи на основі зміни напруги (струму) промислової частоти РЕМ. Узагальнена класифікація цих методів представлена на рис. 1.13.

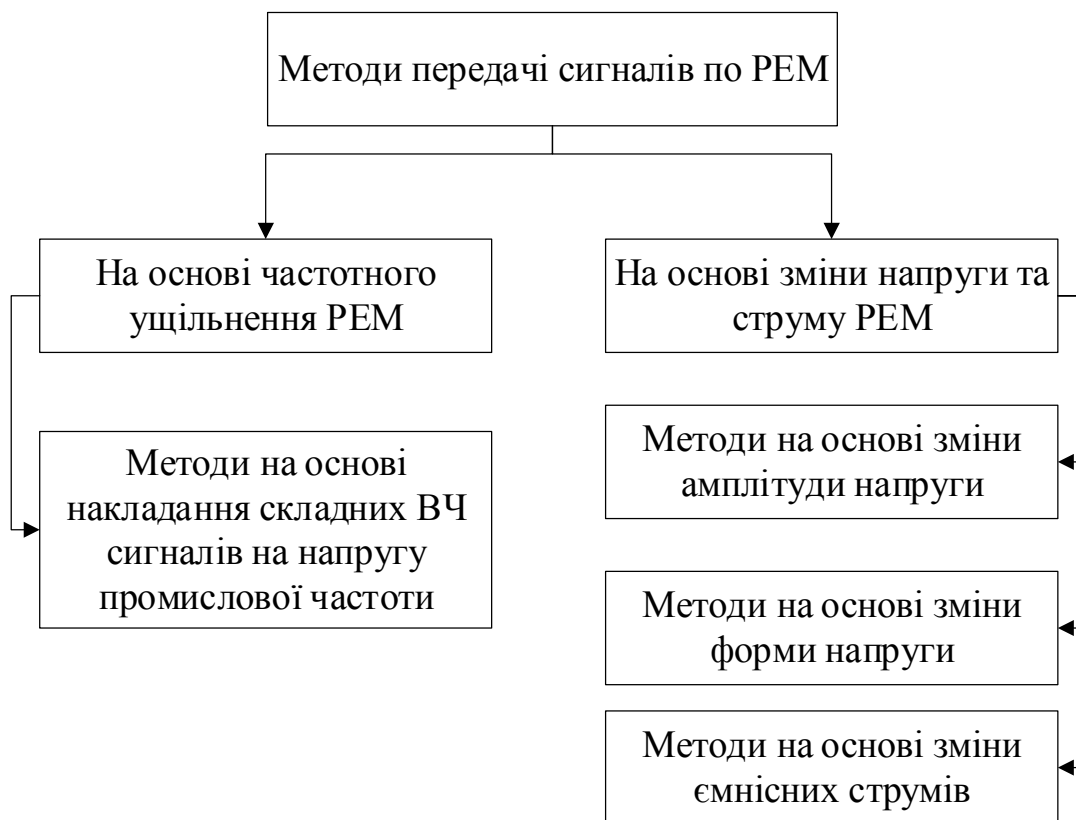


Рисунок 1.13 – Класифікація методів передачі сигналів по РЕМ

Методи на основі зміни напруги та струму РЕМ є більш стійкими до завад, оскільки у якості носія використовується потужний сигнал, отриманий внаслідок спотворення струму та напруги промислової частоти. Але разом із тим спотворення напруги та струму промислової частоти негативно впливає на якість електроенергії; використання даних методів обмежене використанням РЕМ

малої потужності, а також частотний діапазон сигналів, що можна отримати даними методами [15].

Методи на основі частотного ущільнення РЕМ основані на накладанні сигналів (як правило більш високої частоти) на напругу (струм) промислової частоти [15, 38, 39, 56, 79]. При цьому сам процес накладання сигналів на напругу (струм) промислової частоти потребує підключення апаратури передачі до мережі високої напруги. Тому розроблено ряд методів підключення апаратури передачі та прийому до РЕМ. Класифікація методів підключення приймально-передавальної апаратури до РЕМ представлено на рис. 1.14.

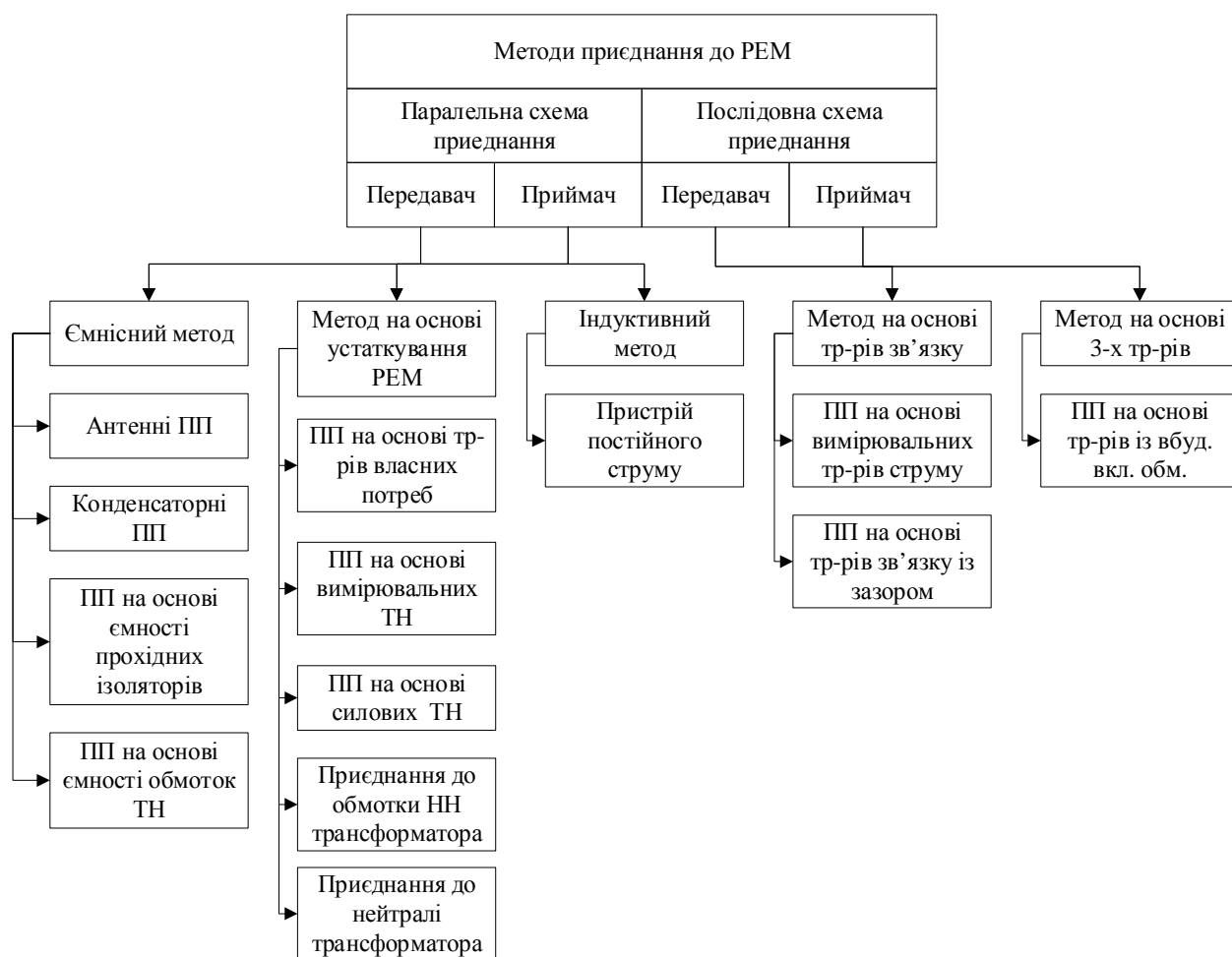


Рисунок 1.14 – Класифікація методів підключення приймально-передавальної апаратури до РЕМ

Методи на основі використання устаткування РЕМ для передачі інформаційних сигналів використовують для підключення силове та

вимірювальне устаткування РЕМ першочергове призначення якого полягає у забезпеченні технологічного процесу розподілення електроенергії. Використання наявного силового та вимірювального обладнання РЕМ суттєво здешевлює систему. Існують підходи із використанням силових трансформаторів та трансформаторів власних потреб, вимірювальних трансформаторів напруги та струму. Останні з яких використовуються в якості пристроїв приєднання (ПП) на стороні прийому, оскільки при передачі сигналів вони вносять суттєве загасання.

Однак даний метод має суттєві недоліки. Зокрема існує суттєвий вплив на процес розповсюдження сигналів по РЕМ частотних характеристик ліній РЕМ та силового і вимірювального обладнання РЕМ, що використовуються в якості ПП. Особливо суттєвий вплив здійснює силове та вимірювальне устаткування, яке розраховане на роботу на промисловій частоті, а не у високочастотному діапазоні. Слід також зазначити, що силове та вимірювальне устаткування являє собою як правило трансформаторне устаткування з індуктивним характером навантаження і відповідно збільшує загасання сигналів, що проходить по них із ростом частоти.

Серед методів приєднання до РЕМ традиційним є ємнісний метод, який реалізовано в антенних, конденсаторних пристроях приєднання (ПП), ПП, що використовують ємність прохідних ізоляторів та ємність обмоток ТН. При роботі таких ПП використовують властивість конденсаторів, що полягає у низькому опорі конденсатора для ВЧ сигналів, та високий опір для сигналів низької частоти, а саме напруги промислової частоти, що дозволяє пропускати ВЧ сигнали від апаратури передачі до РЕМ, при цьому ізолювати апаратуру передачі від високої напруги промислової частоти. Саме зниження опорі конденсатора із зростанням частоти дозволяє піднімати частоту ВЧ сигналів.

Даний метод є найбільш поширеним серед інших і особливо широко використовується для передачі сигналів по ЛЕП 110 кВ і вище [15, 38, 77, 78, 79]. Як правило при використанні такого методу використовується встановлення додаткового обладнання з метою локалізації ВЧ тракту по ЛЕП від іншої частити



мережі. Подібний підхід використовується і при передачі сигналів по РЕМ, коли РЕМ є мало розгалуженою (наприклад РЕМ великих промислових підприємств). Однак при сильній розгалуженості РЕМ такий метод суттєво підвищує вартість систем передачі сигналів по РЕМ, оскільки потребує значної кількості високовольтного обладнання, зокрема ВЧЗ. Також встановлення ВЧЗ підтримує струм при відключенні КЗ, що зменшує ресурс комутаційного обладнання.

При використанні такого підходу для РЕМ без додаткового обладнання суттєвий вплив на сигнали, що передаються по РЕМ здійснює вся РЕМ, а не тільки ті ділянки, що з'єднують точки передачі та прийому, що знижує якість передачі сигналів по РЕМ. Тому доцільним є використання для передачі по РЕМ сигналів, що є стійкими до спотворень. На сьогоднішній день найбільш стійкими до спотворень та завад є широкополосні сигнали (ШПС) [100].

### **1.3.3 Широкополосні сигнали як основа систем передачі по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ**

Виходячи з того, що РЕМ призначені для передачі електроенергії промислової частоти та при передачі ВЧ сигналів лінії та інше електроустаткування РЕМ вносять загасання та здійснюють спотворення ВЧ сигналів, необхідно ретельно підходити до вибору типу ВЧ сигналів, що будуть використовуватися для передачі по РЕМ в засобах інформаційного забезпечення СК РЕМ.

В загальному випадку для будь-яких ВЧ сигналів, що використовуються в якості інформаційних, справедливою є теорема К. Шеннона [101], у відповідності до якої максимальна пропускна здатність КПД в загальному випадку визначається як

$$C = Df \log_2 \frac{P_c}{P_u} \quad (1.1)$$

де:  $Df$  – ширина полоси частот, яку займає сигнал;

$P_c$  – середня потужність сигналу;

$P_u$  – середня потужність шуму.

У відповідності з (1.1) підвищення пропускної здатності КПД може бути досягнуто за рахунок збільшення співвідношення  $\frac{P_c}{P_{ш}}$  або розширенням полоси частот  $\Delta f$ , яку займає сигнал.

Першим методом підвищення пропускної здатності КПД є підвищення  $\frac{P_c}{P_{ш}}$ , що призводить до підвищення потужності сигналу, що передається по КПД, при наявності сконцентрованих в частотній області передачі потужних завад (наприклад від імпульсних джерел живлення, або силових інверторів). Також підвищення потужності обмежується існуючими стандартами на електромагнітну сумісність устаткування та норми на граничні рівні електромагнітного випромінення [102, 103].

Другим методом підвищення пропускної здатності згідно з (1.1) є розширення полоси частот  $\Delta f$  сигналу, що передається по РЕМ, що досягається шляхом використання спеціальних широкополосних сигналів [104, 105, 106]. До переваг даних сигналів слід віднести:

- підвищення стійкості до вузькополосних завад;
- зниження спектральної щільності енергії сигналу;
- підвищення електромагнітної сумісності;
- створення множинного доступу в одній полосі [104, 106, 107, 108].

Всі способи отримання широкополосних сигналів поділяються на 2 способи:

- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). Широкополосні сигнали, що отримуються методом розширення спектру методом прямої послідовності. У системах з DSSS розширення спектра сигналу в кілька разів дозволяє в стільки ж разів зменшити спектральну щільність потужності сигналу. Розширення спектра звичайно здійснюється шляхом множення порівняно вузькополосного сигналу на шумоподібний розширювальний сигнал (або псевдо шумоподібний код), який часто називається шумоподібним або

шумоутворюючим [105, 106]. Принцип описаного розширення спектра показаний на рис. 1.15.  $A_n = f(i, m(t))$

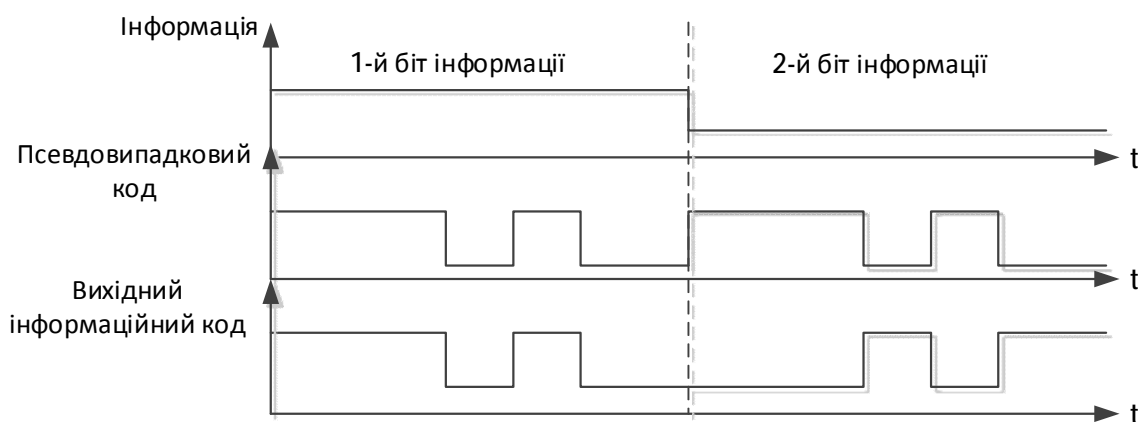


Рисунок 1.15 – Принцип одержання широкополосного сигналу по методу прямої послідовності (DSSS)

- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). Стрибкоподібна зміна частоти. При такому способі модуляції виконується часта зміна частоти-носія сигналу у відповідності до шумоутворюючої послідовності, що дозволяє побудувати канали, стійкі до глушіння та з провалами в спектрі частот [106, 109]. Принцип описаного розширення спектра показаний на рис. 1.16.

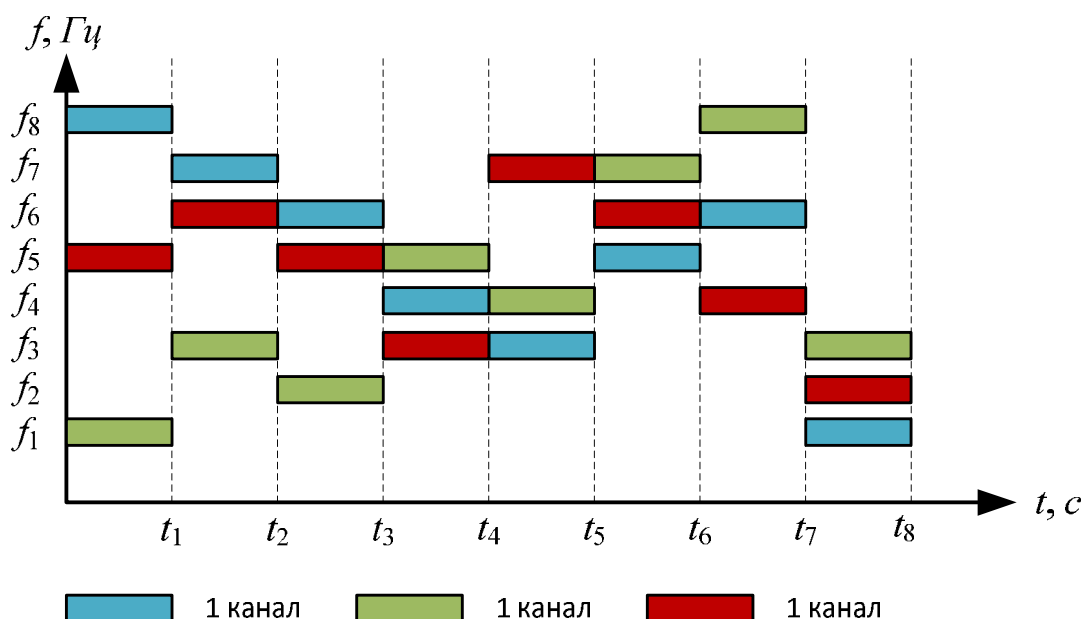


Рисунок 1.16 – Принцип одержання широкополосного сигналу по методу стрибкоподібного перестроювання частоти (FHSS)

Окремо в рамках методу стрибкоподібної зміни частоти у зв'язку особливої вживаності в системах зв'язку слід відзначити мультиплексування з ортогональним частотним розподіленням (Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM). Є цифровою схемою модуляції, що використовує багато близько розташованих ортогональних частот-носіїв, кожна з яких модулюється одним з класичних вузькополосних способів модуляції [110, 111, 112]. Графічне зображення розподілення частот-носіїв вздовж частотного діапазону зображене на рис. 1.17.

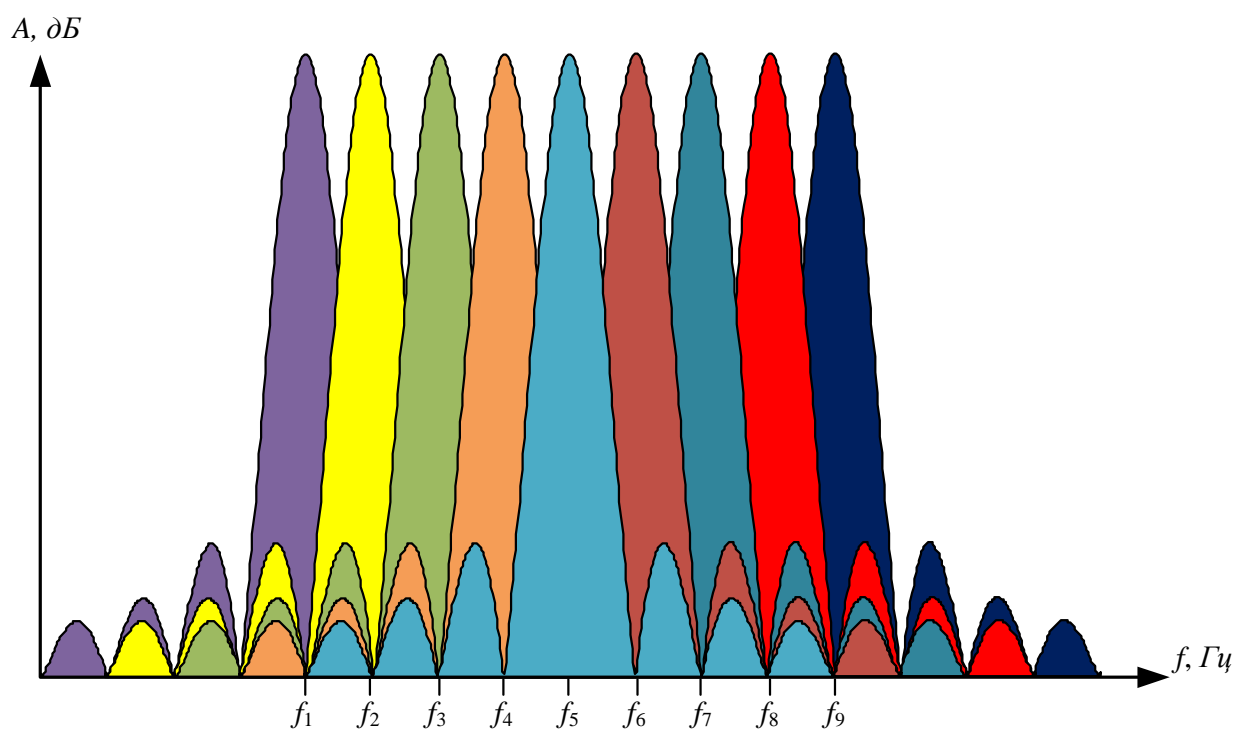


Рисунок 1.17 – Спектр OFDM сигналу

Наряду із перевагами ШПС слід зазначити погану дослідженість питань розповсюдження ШПС по РЕМ, а особливо вплив характеристик РЕМ та елементів РЕМ на процес розповсюдження ШПС. Пов'язане це із суттєвим зростанням частот, що використовуються для передачі ШПС по РЕМ, а також із розширенням полоси частот ШПС сигналів у порівнянні із класичними типами сигналів, що використовуються для передачі по РЕМ.

У зв'язку із цим для використання ШПС для передачі по РЕМ необхідно провести аналіз підходів до побудови ШПС та оцінити вплив частотних

характеристик РЕМ на процес розповсюдження ШПС по ним. Оцінити методи аналітичного розрахунку частотних характеристик РЕМ та їх придатність до практичного застосування. Розробити методику та провести експериментальне дослідження типових РЕМ України для отримання вихідних даних до побудови систем передачі сигналів по РЕМ із використанням ШПС.

### **Висновки по розділу 1**

1. На основі аналізу топологій міських та районних РЕМ 10 кВ України встановлено, що найбільш поширеними лініями 10 кВ міських РЕМ є лінії довжиною до 500 м, при цьому їх максимальна довжина становить 7 км, а поперечні перерізи провідників знаходяться в межах 70-95 мм<sup>2</sup> для 80% всіх ліній. Для районних РЕМ 10 кВ 80% всіх ліній мають довжину до 1000 м, а максимальна довжина сягає 12 км. Більше 85% поперечних перерізів провідників ліній 10 кВ районних РЕМ становлять 50 мм<sup>2</sup> та 70 мм<sup>2</sup>. Більше 80% всіх ТП та РП міських та районних РЕМ 10 кВ мають до 2 приєднань. Отримані дані дозволили обрати типову ділянку РЕМ для проведення досліджень.
2. Встановлено, що тенденції розвитку ОЕС України, які пов'язані із збільшенням кількості розосереджених джерел енергії та зростанням обсягів споживання, ставлять додаткові вимоги до СК РЕМ серед яких керування великою кількістю об'єктів управління в реальному часі, децентралізоване зберігання інформації та оперативний доступ до неї, керування навантаженням споживачів, організація роботи ділянок РЕМ в межах ізольованих островів та із об'єктами малої генерації зі змінною потужністю генерації. Це обумовлює зростання об'ємів інформації для реалізації вимог до СК РЕМ.
3. Реалізація додаткових вимог до СК РЕМ потребує більш складних та оптимальних алгоритмів керування, які ґрунтуються на управлінні об'єктами генерації, розподілення та споживання РЕМ як єдиною системою. Це вимагає підвищення керованості вузлів РЕМ шляхом

встановлення автоматичних і автоматизованих засобів керування та об'єднання їх в єдину інформаційну мережу.

4. Об'єднання в єдину інформаційну мережу об'єктів керування СК РЕМ повинно здійснюватися із застосуванням сучасних технологій інформаційної взаємодії, що використовують протоколи TCP/IP із застосуванням різних середовищ передачі інформаційних сигналів. При цьому слід відмітити наявність великої кількості засобів РЗА СК РЕМ, що використовують застарілі технології інформаційної взаємодії, що потребує додаткових підходів для їх інтеграції в єдину інформаційну мережу СК РЕМ.
5. Аналіз підходів до побудови інформаційних мереж СК РЕМ показав, що за техніко-економічними показниками доцільним є використання РЕМ 0,4...10 кВ для передачі інформаційних ШПС.

## РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОПОЛОСНИХ СИГНАЛІВ ПО РОЗПОДІЛЬНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ МЕРЕЖАМ 0,4...10 КВ

### 2.1. Спектри інформаційних сигналів, що передаються по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ

Аналіз робіт [15, 38, 39, 45, 61, 68, 73, 79, 80, 99, 113, 114] показав, що системи інформаційного забезпечення систем керування РЕМ 0,4...110 кВ із використанням РЕМ в якості середовища передачі сигналів будуються на основі використання частотного ущільнення РЕМ із використанням як широко відомих вузькополосних сигналів, що базуються як на класичних амплітудній, частотній та фазовій модуляції, або їх комбінації (таких як, наприклад, квадратурна модуляція), так і на більш сучасних широкополосних сигналах (ШПС).

На основі аналізу вищезазначених робіт запропоновано класифікацію способів побудови інформаційних сигналів, що використовуються для передачі по РЕМ 0,4...10 кВ, яка представлена на рис. 2.1.

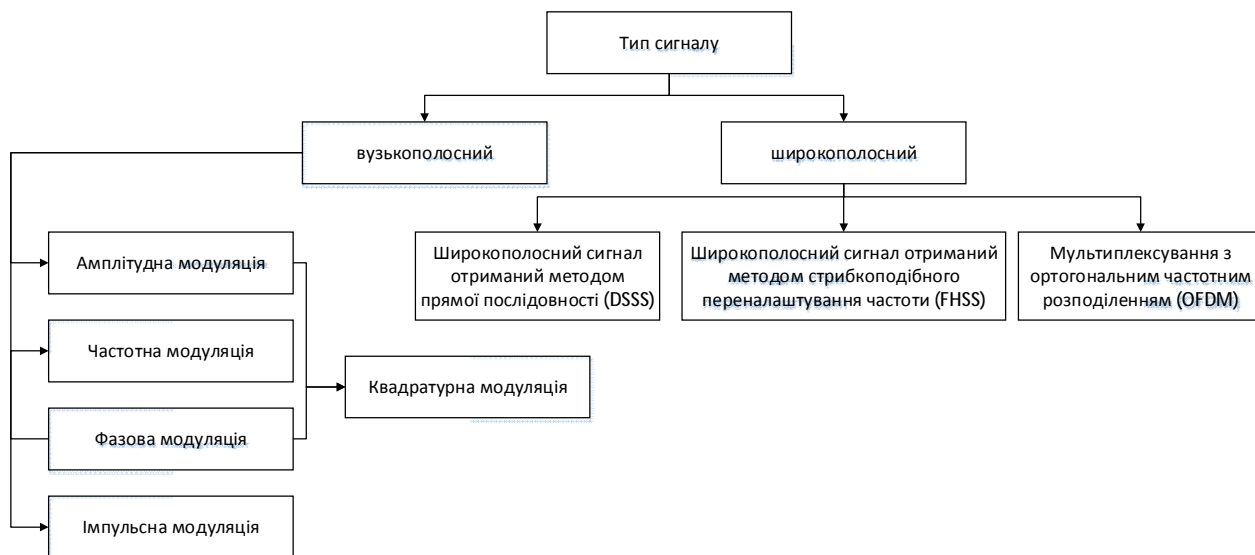


Рисунок 2.1 – Класифікація способів отримання інформаційних сигналів для  
передачі по РЕМ 0,4...10 кВ

В загальному вигляді інформаційний сигнал  $s(t)$  можна представити у вигляді:

$$s(t) = A(t) \sin(w(t)t + j(t)) \quad (2.1)$$

При використанні ШПС для передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10кВ, сигнал розбивається на ряд елементарних сигналів, які називаються чіпами, що локалізовані в межах часових інтервалів довжиною  $t_0$  [115]. Кожному елементарному сигналу відповідає окремий елемент ШПС послідовності у відповідності з яким проводиться модуляція. Зазвичай в межах одного елементарного сигналу, що відповідає інтервалу  $[0; t_0]$ , ШПС сигнал має постійні параметри, тому складові сигналу  $s(t)$  можна записати як:

$$\begin{aligned} A(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} A_n u_0(t - nt_0) \\ w(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} w_n u_0(t - nt_0) \\ j(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} j_n u_0(t - nt_0) \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $u_0(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0; t_0] \\ 0, & t \notin [0; t_0] \end{cases}$  прямокутний імпульс.

У випадку модуляції окремих елементарних сигналів по  $A(t)$  та  $j(t)$  отримуємо DSSS ШПС, якщо ж змінюємо  $w(t)$  – отримуємо FHSS ШПС. Враховуючи отримані залежності, результуючий сигнал можна записати як:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n u_0(t - nt_0) \sin(w_n u_0(t - nt_0)t + j_n u_0(t - nt_0)) \quad (2.3)$$

Представимо  $s(t)$  як:

$$s_n(t) = A_n u_0(t) \sin(w_n u_0(t)t + j_n u_0(t)) \quad (2.4)$$

Тоді

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t - nt_0) \quad (2.5)$$

Спектр отриманого сигналу  $s(t)$  у загальному випадку можна представити як:





Розглянемо спектр комплексної огибаючої  $U_n(\omega)$ .

$$U_n(\omega) = \int_0^{t_0} \dot{y}_n(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^{t_0} \dot{A}_n e^{-j\omega t} dt = A_n \int_0^{t_0} \dot{e}^{-j\omega t} dt = A_n t_0 \frac{\sin \frac{\omega t_0}{2}}{\frac{\omega t_0}{2}} e^{-j\frac{\omega t_0}{2}} \quad (2.10)$$

Тоді

$$\begin{aligned} |S_n(\omega)| &= |U_n(\omega_n - \omega)| = \left| \frac{A_n t_0 \sin \frac{(\omega_n - \omega) t_0}{2}}{\omega (\omega_n - \omega) t_0} e^{-j\frac{(\omega_n - \omega) t_0}{2}} \right| = \\ &= A_n \left| \frac{\frac{1}{2} \sin \frac{(\omega_n - \omega) t_0}{2}}{\frac{\omega (\omega_n - \omega) t_0}{2}} \right| \end{aligned} \quad (2.11)$$

Графічне зображення залежності  $|S_n(\omega)|$  наведено на рис. 2.2.

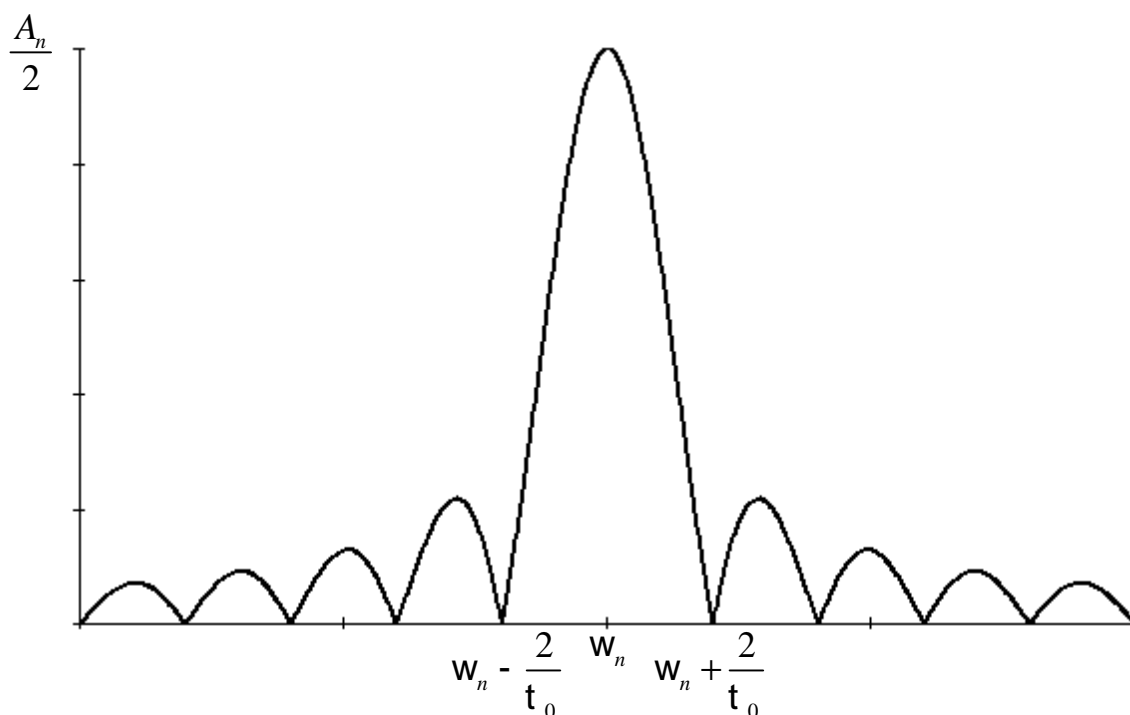


Рисунок 2.2 – Графічне представлення спектру  $|S_n(\omega)|$

Проведемо аналіз енергії ШПС. Як відомо енергія сигналу визначається за формулою:  $S_Y(w)$

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(w)|^2 dw \quad (2.12)$$

Тоді для сигналу, що розглядається, вираз набуде наступного вигляду:

$$E_n = \int_0^{t_0} A_n^2 dt = A_n^2 \int_0^{t_0} dt = A_n^2 t_0 \quad (2.13)$$

У відповідності із рівністю Парсеваля (2.14) енергетичний спектр сигналу можна знайти за допомогою спектральної щільності сигналу. Зокрема  $|S(w)|^2$  є не що інше як спектральна щільність енергії або енергетичний спектр.

$$\int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(w)|^2 dw \quad (2.14)$$

Тоді

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(w)|^2 dw = A_n^2 t_0 \quad (2.15)$$

Розглянемо залежність енергетичного спектра в залежності від частоти. Енергетичний спектр амплітудо-модульованого сигналу за формою є ідентичним до спектру прямокутного імпульсу при  $t \in \left[ -\frac{t_0}{2}, \frac{t_0}{2} \right]$  і описується виразом:

$$|S_n(w)| = A_n t_0 \left| \frac{\sin \frac{wt_0}{2}}{\frac{wt_0}{2}} \right|, \quad (2.16)$$

Підставивши значення спектру в вираз для визначення енергії сигналу, отримаємо:

$$E_n(w) = \frac{1}{2p} |S_n(w)|^2$$

$$E_n(w) = \frac{A_n^2 t_0^2}{2p} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}}. \quad (2.17)$$

Енергетичний спектр найближче до  $w=0$  перетинає вісь абсцис при  $w = \pm \frac{2p}{t_0}$ .

$$E_{n_{\text{норм}}} (w) = \frac{E_n(w)}{E_n} = \frac{t_0}{2p} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}} \quad (2.18)$$

Залежність нормованого енергетичного спектру від частоти описується виразом (2.18) і його графічна залежність наведена на рис. 2.3.

Розглянемо енергію першої пелюстки енергетичного спектра (тобто при  $w \in [-\frac{2p}{t_0}; \frac{2p}{t_0}]$ ). Для цього необхідно проінтегрувати енергетичний спектр по  $w$ .

$$E_{n_{el_1}} = \int_{-\frac{2p}{t_0}}^{\frac{2p}{t_0}} \frac{t_0}{2p} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}} dw = \frac{t_0}{2p} \int_{-\frac{2p}{t_0}}^{\frac{2p}{t_0}} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}} dw =$$

$$= \frac{2t_0}{2p t_0} \int_{-\frac{2p}{t_0}}^{\frac{2p}{t_0}} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}} d \frac{w t_0}{2} = \frac{1}{p} \int_{-\frac{2p}{t_0}}^{\frac{2p}{t_0}} \frac{\sin^2 \frac{\pi w t_0}{2}}{\frac{w^2 t_0^2}{4}} d \frac{w t_0}{2} \quad (2.19)$$

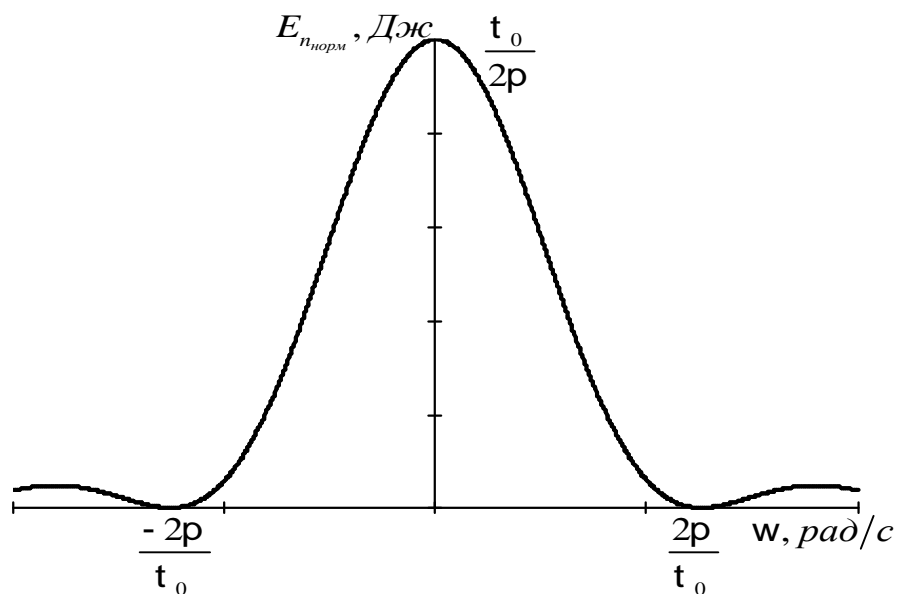


Рисунок 2.3 – Нормований спектр  $|S_n(w)|$

Введення заміни  $\frac{wt_0}{2} = z$  дозволяє привести вираз (2.19) до вигляду:

$$E_{n_{e\eta_1}} = \frac{1}{p} \int_{-p}^p \frac{\sin^2(z)}{z^2} dz \quad (2.20)$$

При цьому  $w \in \left[-\frac{2p}{t_0}; \frac{2p}{t_0}\right]$ , тоді  $z \in [-p; p]$ .

Аналітичне розв'язання інтегралу (2.20) в загальному випадку має вигляд:

$$\int_0^{\pi} \frac{\sin^{2m} z}{z^2} dz = -\frac{2m}{\pi} \frac{1}{2^{2m}} + \frac{(-1)^m}{2^{2m-1}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(-1)^{k+1}}{k!} \frac{2m}{\pi} \frac{\cos((2m-2k)z)}{z} + (2m-2k) \sin((2m-2k)z) \quad (2.21)$$

де  $\frac{2m}{\pi} = \frac{2m!}{m!(2m-m)!} = \frac{2}{m!}$  – бінома Ньютона [116] при  $n=2m, k=m$

Відповідно до випадку, що розглядається,  $m=1$ :

$$\begin{aligned}
\int_0^p \frac{\sin^2 z}{z^2} dz &= -\frac{1}{2z} - \frac{1}{2} \frac{\cos(2z)}{z} + 2 \operatorname{si}(2z) + \\
&+ \frac{1}{p} \frac{1}{2p} + \frac{\cos(2p)}{2p} + \operatorname{si}(2p) - \frac{1}{-2p} + \frac{\cos(-2p)}{-2p} + \operatorname{si}(-2p) = \\
&= -\frac{1}{2z} + \frac{\cos(2z)}{2z} + \operatorname{si}(2z)
\end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $\operatorname{si}(x) = -\int_x^\infty \frac{\sin(t)}{t} dt = -\frac{p}{2} + \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k x^{2k+1}}{(2k+1)(2k+1)!}$  – функція інтегрального синуса [117]. Тоді енергія першої пелюстки відносно повної енергії сигналу  $s_n(t)$ :

$$\begin{aligned}
E_{\text{відн}} &= \frac{1}{p} \left[ -\frac{1}{2x} + \frac{\cos(2x)}{2x} + \operatorname{si}(2x) \right]_0^p = \frac{1}{p} \left[ -\frac{1}{2x} + \frac{\cos(2x)}{2x} + \operatorname{si}(2x) \right]_{-\infty}^p = \\
&= \frac{1}{p} \left[ -\frac{1}{2p} + \frac{1}{2p} + \operatorname{si}(2p) - \left( -\frac{1}{-2p} + \frac{1}{-2p} + \operatorname{si}(-2p) \right) \right] = \\
&= \frac{1}{p} (\operatorname{si}(2p) - \operatorname{si}(-2p)) = \frac{1}{p} (\operatorname{si}(2p) - (-\operatorname{si}(2p))) = \\
&= \frac{1}{p} (\operatorname{si}(2p) + p + \operatorname{si}(2p)) = \frac{1}{p} (p + 2\operatorname{si}(2p)) = 1 + \frac{2\operatorname{si}(2p)}{p} = \\
&= 0,90282 \text{ (в.о.)}
\end{aligned} \quad (2.23)$$

Відповідно до (2.23), перша пелюстка спектра амплітудо-модульованого сигналу містить 90,282% енергії сигналу. На практиці, зазвичай, спектр амплітудо-модульованого сигналу обмежують межами першої пелюстки його спектра.

Проведемо аналіз впливу окремих параметрів послідовності шляхом зміни кожного з них окремо. При зміні  $A_n$  отримуємо амплітудо-модульований сигнал. Для одного елементарного сигналу  $t \in [0; t_0]$ , що розглядається, характерним є  $A_n = \text{const}$  при  $w_n = w_0 = \text{const}$ ,  $j_n = j_0 = \text{const}$  при  $t \in [0; t_0]$  отримаємо (2.8).

Розглянемо фазо-модульований сигнал. При фазовій модуляції в межах одного елементарного сигналу  $t \in [0; t_0]$ ,  $j_n = \text{const}$ ,  $A_n = A_0 = \text{const}$  і

$w_n = w_0 = \text{const}$ , при  $t \in [0; M_0]$ . Тоді вираз для  $n$ -ого елементарного фазо-модульованого сигналу можна записати у вигляді:

$$u(t) = A_0 \cos(w_0 t + j_n) = \text{Re}(V_n(t) e^{j w_0 t}) \quad (2.24)$$

де  $V_n(t) = A_0 e^{j j_n}$ . Представимо  $j_n = m \sin(W_n) + j_0$ , де  $m = \max |j_n|$  – індекс фазової модуляції, за умови, що  $j_0 = 0$ , тоді будемо мати  $V_n(t) = A_0 e^{j m_j \sin(W_n)}$ .

Як відомо із теорії Бесселевих функцій [116]:

$$e^{j z \sin(x)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(z) e^{j n x}, \quad (2.25)$$

де  $I_n(z)$  – функція Бесселя 1-го роду  $n$ -го порядку від аргументу  $z$ .

Тоді:

$$V_n(t) = A_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m_j) e^{j n W_n}, \quad (2.26)$$

Спектральна щільність отриманого сигналу, враховуючи (2.9), визначається спектральною щільністю огибаючого сигналу, яка для фазо-модульованого сигналу записується у вигляді:

$$\begin{aligned} U_n(w) &= \int_0^{t_0} V_n(t) e^{-j w t} dt = \int_0^{t_0} A_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m_j) e^{j j_n} e^{j w_0 t} e^{-j w t} dt = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_0 I_n(m_j) \int_0^{t_0} e^{j w_0 t} e^{-j w t} dt = S_{n_{AM}}(w) e^{j j_n} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Тоді енергетичний спектр фазо-модульованого сигналу можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} E_{n_{\Phi M}}(w) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U_{n_{\Phi M}}(w)|^2 dw = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U_{n_{AM}}(w) e^{j j_n}|^2 dw = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U_{n_{AM}}(w)|^2 |e^{j j_n}|^2 dw = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U_{n_{AM}}(w)|^2 dw = E_{n_{AM}}(w) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Аналіз отриманого виразу (2.28) показав, що енергетичний спектр фазо-модульованого сигналу повністю співпадає із спектром амплітудо-

модульованого сигналу і відповідно в першій пелюстці енергетичного спектра лежить 90,282% енергії сигналу.

У випадку частотної модуляції при передачі цифрових сигналів спостерігається передача інформації на дискретних  $\omega_n$ , де  $\omega_n \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ . Енергетичний спектр частото-модульованого сигналу можна розглядати як суперпозицію амплітудних спектрів складових на кожній з частот  $\omega_n \in [\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ . В межах одного елементарного сигналу при  $t \in [0; t_0]$  для частотно-модульованого сигналу характерним є  $\omega_n = \text{const}$ ,  $A_n = A_0 = \text{const}$ ,  $j_n = j_0 = \text{const}$  при  $t \in [0; t_0]$ . Тоді, вираз для  $n$ -ого елементарного частото-модульованого сигналу можна записати у вигляді:

$$u(t) = A_0 \cos(\omega_n t + j_0) = \text{Re}(\tilde{u}(t) e^{j\omega_n t}) \quad (2.29)$$

де  $\tilde{u}(t) = A_0 e^{j j_0}$  – огибающая сигналу. Складова  $e^{j\omega_n t}$  відображає переміщення сигналу  $\tilde{u}(t)$  в окіл частоти  $\omega_n$ .

В результаті аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що для амплітудно- та фазо-модульованих сигналів енергетичні спектри містять 90,282% енергії в межах першої пелюстки амплітудного спектра

$$\omega \in \left[ \omega_0 - \frac{2\pi}{t_0}; \omega_0 + \frac{2\pi}{t_0} \right]$$

При аналізі огибающей частото-модульованого сигналу можна скористатися результатами, що отримані для амплітудно- та фазо-частотно модульованих сигналів оскільки при частотній модуляції для кожної з частот  $\omega_n = \text{const}$  сигнал можна розглядати як (2.20).

При частото-модульованому сигналі результуючий спектр складається із суперпозиції спектрів сигналів на частотах  $\omega_n = \text{const}$ , відповідно, енергетичний

$$\text{спектр буде лежати в частотному діапазоні } \omega \in \left[ \omega_{\min} - \frac{2\pi}{t_0}; \omega_{\max} + \frac{2\pi}{t_0} \right]$$



Таким чином, ШПС із частотною маніпуляцією являє собою суму спектрів сигналів  $V(t)$ , що переміщені в окіл частот  $\omega_n$ . Для визначення спектру частот частото-маніпульованого сигналу використовують параметр  $\omega_0$  – центральну частоту полоси сигналу та  $\omega_\delta = \max|\omega_n - \omega_0|$  – девіація частоти. Тоді ширина спектра, що займає фазоманіпульований сигнал запишеться як:

$$\omega \in \left[ \omega_0 - \omega_\delta - \frac{2\pi}{T_0}; \omega_0 + \omega_\delta + \frac{2\pi}{T_0} \right] \quad (2.30)$$

Таким чином за рахунок концентрації в межах першої пелюстки спектру інформаційного сигналу 90,282% енергії. Решта енергії сигналу втрачається на виході передавача, що призводить до спотворення сигналу ще до його передачі [1].

## 2.2. Розробка методу формування сигналів з підвищеною ефективністю використання частотного спектру для передачі по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ

Для зменшення частини енергії сигналу, що виходить за рамки першої пелюстки його спектру, запропоновано новий метод, який полягає у виконанні додаткового перетворення сигналу в межах кожного елементарного сигналу окремо із застосуванням функцій  $y(t)$  обмежених як в частотному, так і в часовому просторах, але таких, що є безперервно інтегрованими та диференційованими на всьому часовому інтервалі. Блок-схема модулятора, що реалізує запропонований метод представлена на рис. 2.4.

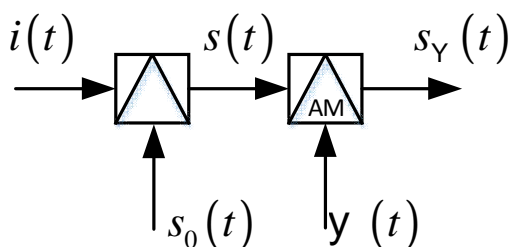


Рисунок 2.4 – Блок-схема модулятора із додатковою амплітудною модуляцією

Розглянемо спектр сигналу, який отримано в результаті додаткової амплітудної модуляції в межах кожного елементарного сигналу  $[0; t_0]$  із використанням функції  $y(t)$  із спектром  $Y(w)$  обмеженим в частотному просторі  $[-w_Y; w_Y]$ . Тобто:

$$\begin{aligned} y(t) &\hat{=} [0; t_0] \\ Y(w) &\hat{=} [-w_Y; w_Y] \end{aligned} \quad (2.31)$$

В цьому випадку результуючий сигнал матиме вигляд:

$$s_Y(t) = s(t)y(t) \quad (2.32)$$

Виходячи з теорії згортання сигналів в часовому просторі [116, 118], якщо сигнал  $s(t) \ll S(w)$ , а  $y(t) \ll Y(w)$ , то спектр результуючого сигналу має вигляд:

$$S_Y(w) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(w) S(w - Dw) dDw \quad (2.33)$$

Враховуючи частотну обмеженість спектра функції  $y(t)$ , вираз (2.33) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} S_Y(w) &= \int_{-\infty}^{-w_Y} Y(w) S(w - Dw) dDw + \\ &+ \int_{-w_Y}^{w_Y} Y(w) S(w - Dw) dDw + \\ &+ \int_{w_Y}^{\infty} Y(w) S(w - Dw) dDw \end{aligned} \quad (2.34)$$

Оскільки  $Y(w) \hat{=} [-w_Y; w_Y]$ , то  $\int_{-\infty}^{-w_Y} Y(w) S(w - Dw) dDw = 0$  та

$$\int_{w_Y}^{\infty} Y(w) S(w - Dw) dDw = 0.$$

Тоді вираз (2.34) приймає вигляд:

$$S_Y(w) = \int_{-w_Y}^{w_Y} Y(w) S(w - Dw) dDw \quad (2.35)$$

тобто спектр результуючого сигналу  $S_Y(w) \hat{I} [-w_Y; w_Y]$ .

Найбільш поширеними функціями, що відповідають умовам (2.31) є функції, отримані диференціюванням функції Гауса, які широко використовуються у Вейвлет аналізі [8, 119, 120, 121].

В якості функції для додаткового перетворення сигналу було обрано Wave-вейвлет функцію (2.36), яка є 1-ю похідною функції Гауса.

$$y(t) = t e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2.36)$$

Спектр Wave-вейвлет функції [8, 119, 120, 121], який отримано у відповідності до (2.37) має вигляд, наведений на рис. 2.5.

$$Y(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.37)$$

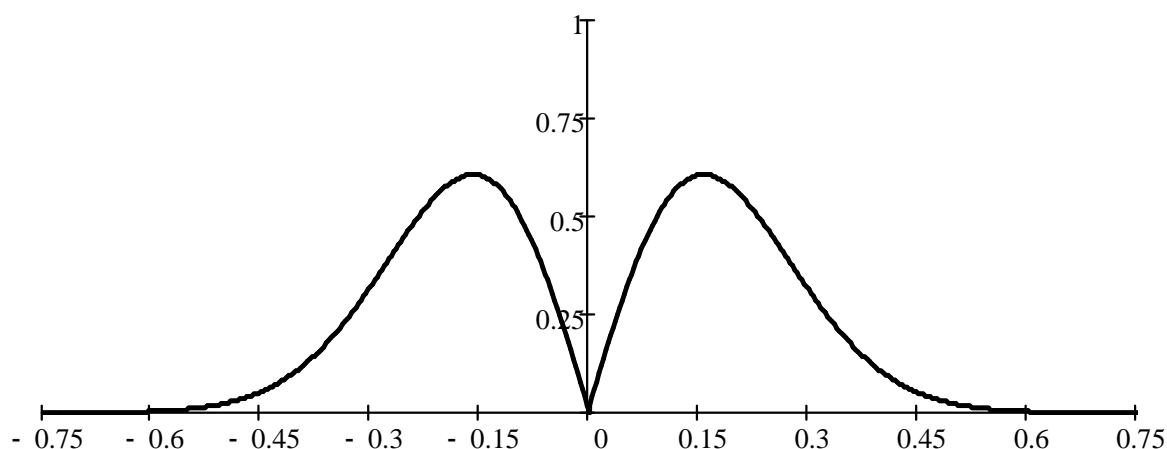


Рисунок 2.5 – Амплітудний спектр функції 1-ї похідної функції Гауса (Wave-вейвлет)

В результаті використання запропонованого підходу отримано ШПС, фрагмент якого представлено на рис. 2.6.

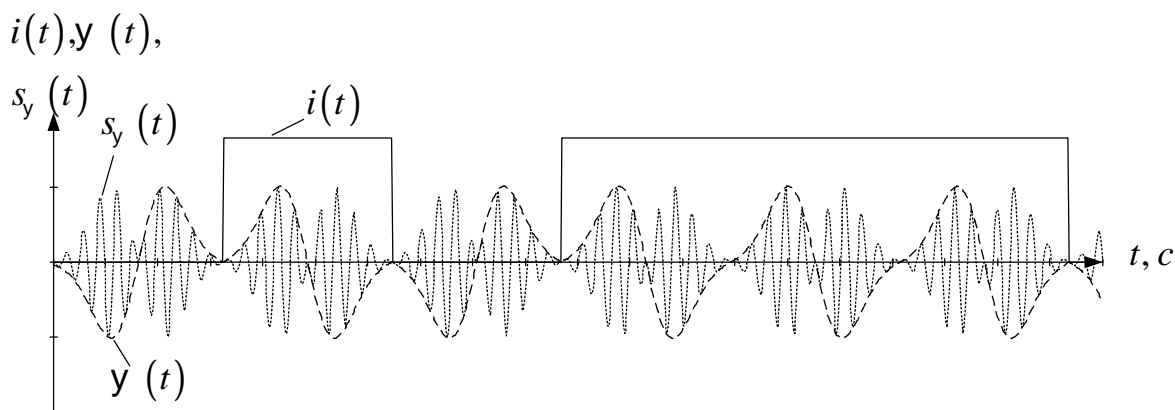


Рисунок 2.6 – Фрагмент інформаційного ШПС сигналу  $i(t)$ , модулюючої функції  $y(t)$  та вихідного сигналу  $s_y(t)$

Слід зазначити швидке згасання як функції Wave-вейвлета в часі, так і її спектра в частотному просторі [119, 122], але  $y(t) = 0$  при  $t = \pm\infty$ . Для визначення енергетичного спектру Wave-вейвлета, обмеженого у часі представимо функцію, що описує спектр Wave-вейвлета у вигляді:

$$Y(w, Dt) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.38)$$

В якості критерію обмеження сигналу в часовому просторі  $t_y$  використано наступні умови:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Y(w, t_y)^2 dw}{\int_{-\infty}^{\infty} Y(w, \infty)^2 dw} \geq 0,99 \\ & \frac{|y(t_y)|}{|y_{\max}|} \leq 0,01 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Система обмежень сигналів (2.39) дозволяють знайти межі сигналу в частотній та часовій площинах при яких в межах одного елементарного сигналу буде міститись 99% його енергії, а на межах сигналу його амплітуда не більше 1% від максимального значення, що зменшує стрибок при обмеженні сигналу в межах одного елементарного сигналу для зменшення крайових викривлень.

Тоді енергетичний спектр вихідного сигналу, що представлено на рис. 2.6 та інформаційного сигналу без додаткової модуляції, отриманий у відповідності до (2.35) буде мати вигляд, що наведено на рис. 2.7.

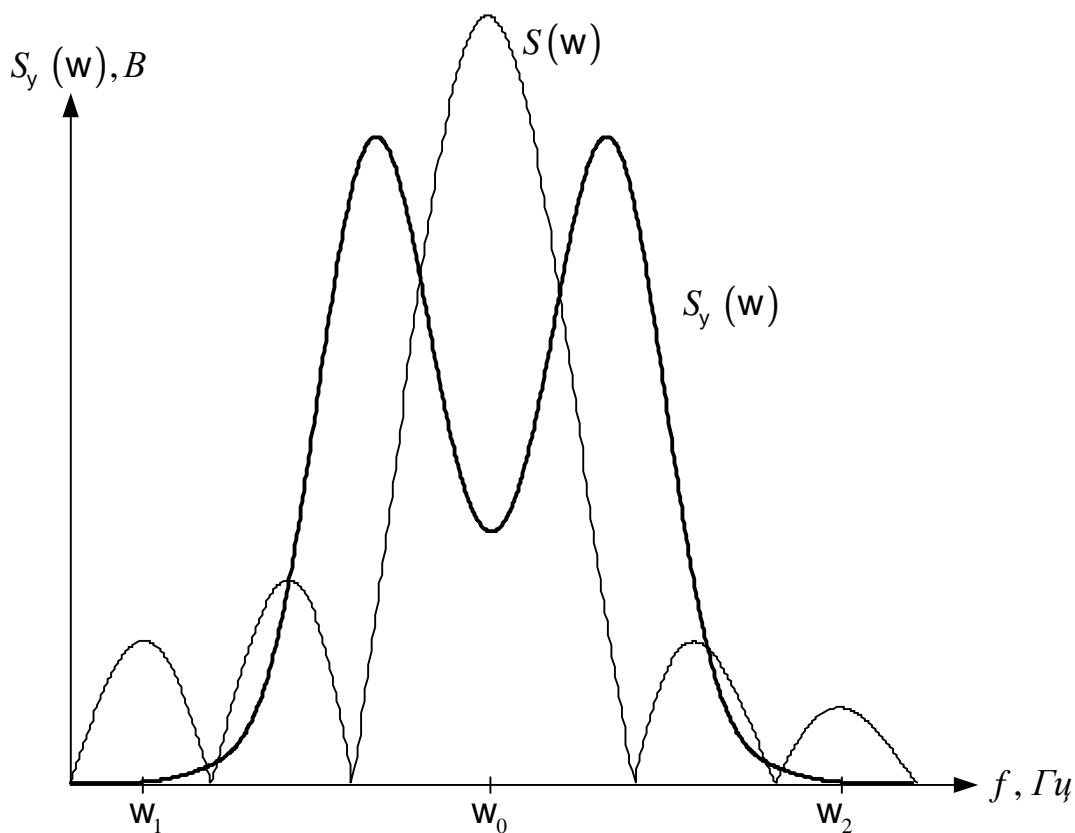


Рисунок 2.7 – Спектр класичного ШПС та ШПС із покращеними характеристиками

Аналіз отриманого спектра ШПС (рис. 2.7) показав, що він є швидко згасаючим і його енергетичний спектр лежить в межах енергетичного спектра Wave-вейвлета, тобто у порівнянні із класичними способами модуляції в ньому відсутні бічні пелюстки, енергія сигналу в межах полоси передачі  $[-w_Y; w_Y]$  становить 99% від повної енергії сигналу, розташована в межах елементарного сигналу за умови використання обмежень у відповідності до (2.39).

Швидкість загасання отриманого спектру більша, ніж спектру амплітудно-модульованого сигналу (див. рис. 2.7), що дає право стверджувати про його частотну локалізацію в заданих межах  $[-w_Y; w_Y]$ .

### 2.3. Оцінка впливу частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ на процес передачі широкополосних сигналів

Для оцінки впливу частотних характеристик РЕМ на процес передачі ШПС представимо сигнал  $s(t)$ , що передається у вигляді ряду Фур'є як

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jq_n} e^{jw_n t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j(w_n t + q_n)} \quad (2.40)$$

де  $S_n(t)$  –  $n$ -а гармоніка;  $C_n$  – амплітуда  $n$ -ої гармоніки;  $q_n$  – початкова фаза  $n$ -ої гармоніки;  $w_n$  – кругова частота  $n$ -ої гармоніки.

Процес розповсюдження сигналу  $s(t)$  по КПД в загальному випадку представимо комплексної функцією передачі  $T(jw) = A(w)e^{j\varphi(w)}$ , де  $A(w)$  и  $\varphi(w)$  – відповідно амплітудно-частотна (АЧХ) та фазочастотна (ФЧХ) характеристики КПД. Кожна складова  $s(t)$  при проходженні по КПД зазнає амплітудних викривлень, які характеризуються АЧХ на частоті гармоніки  $A_n = A(w_n)$  і фазового зсуву, що характеризується значенням ФЧХ на частоті гармоніки  $\varphi_n = \varphi(w_n)$ . Для аналізу прийемо, що КПД не має адитивних завад. Тоді сигнал на виході КПД можна представити як:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n S_n(t) e^{j\varphi_n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n C_n e^{j(w_n t + q_n)} e^{j\varphi_n} \quad (2.41)$$

Для оцінки процесу передачі сигналу  $s(t)$  використаємо коефіцієнт кореляції прийнятого  $y(t)$  та зразкового  $s(t)$  сигналів. Прийемо, що  $s(t) = y(t)$ , тобто зразковий сигнал ідентичний тому сигналу, що подається на вхід КПД [2, 3, 4]. Для застосування сигналу  $s(t)$  для передачі його по РЕМ змінного струму, сигнал  $s(t)$  має мати нульове середнє значення, тобто не містити постійної складової. Відповідно і сигнал на виході КПД на основі

РЕМ 0,4...10 кВ має нульове середнє значення. Тоді коефіцієнт кореляції за період сигналу  $T$  можна записати як:

$$r = \frac{\frac{1}{2T} \int_0^T \dot{v}(t) s(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T \dot{s}^2(t) dt \frac{1}{2T} \int_0^T \dot{v}^2(t) dt}} \quad (2.42)$$

Підставивши (2.40) та (2.41) в (2.42), отримаємо:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} A_n S_n(t) e^{j\omega_n t} \sum_{k=0}^{\infty} A_k S_k(t) e^{-j\omega_k t} dt}{\sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} A_n S_n(t) e^{j\omega_n t} \sum_{k=0}^{\infty} A_k S_k(t) e^{-j\omega_k t} dt \frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} A_n S_n(t) e^{j\omega_n t} \sum_{k=0}^{\infty} A_k S_k(t) e^{-j\omega_k t} dt}} = \\ &= \frac{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt}{\sqrt{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Використавши властивість лінійності інтегралів [116], перетворимо (2.43) до вигляду:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt}{\sqrt{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k S_n(t) S_k(t) e^{j(\omega_n - \omega_k)t} dt}} = \\ &= \frac{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k e^{j(\omega_n - \omega_k)t} S_n(t) S_k(t) dt}{\sqrt{\int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k e^{j(\omega_n - \omega_k)t} S_n(t) S_k(t) dt \int_0^T \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_n A_k e^{j(\omega_n - \omega_k)t} S_n(t) S_k(t) dt}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Із властивостей ортогональності гармонік [118] отримаємо, що

$$\int_0^T S_n(t) S_k(t) dt = 0 \text{ при } n \neq k \text{ і } \int_0^T S_n(t) S_k(t) dt = T \text{ при } n = k. \text{ Тоді вираз (2.44)}$$

можна представити як:

$$r = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^T S_n^2(t) dt \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 e^{2j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt}} \quad (2.45)$$

Прийmemo припущення, що вхiдний опiр  $Z_{in}$  РЕМ в полосi частот КПД не залежить вiд частоти. Тодi

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}}}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}} \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 e^{2j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}}}} = \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}}}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}} \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 e^{2j\omega_n T} \int_0^T S_n^2(t) dt \cdot \frac{1}{Z_{in}}}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Складовi виду  $\frac{1}{T} \int_0^T S_n^2(t) dt$  у виразi (2.46) вiдповiдають виразу для потужностi  $n$ -ої гармонiки [123]. Тодi енергiя  $n$ -ої гармонiки за перiод  $T$  буде визначатися як:

$$E_n = P_n T = T \frac{1}{T} \int_0^T S_n^2(t) dt = \int_0^T S_n^2(t) dt \quad (2.47)$$

Пiдставивши (2.47) в (2.46), отримаемо

$$r = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j\omega_n T} E_n}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} E_n \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 e^{2j\omega_n T} E_n}} \quad (2.48)$$

З використанням отриманого виразу коефiцiєнта кореляцiї функцiї прийнятого i зразкового сигналiв (2.48), проведемо оцiнку впливу АЧХ и ФЧХ КПД на процес передачi сигналiв.



В якості дослідного сигналу виберемо широкополосний DSSS сигнал із фазовою маніпуляцією [101, 106, 124], який в загальному вигляді можна представити як

$$s(t) = A \cos(\omega t + q(t)) \quad (2.49)$$

де  $q(t)$  – модулююча послідовність, яка представляє собою результат суми по модулю 2 інформаційного сигналу  $x(t)$  та шумоутворюючої послідовності  $m(t)$ ; тобто  $q(t) = x(t) \dot{\Delta} m(t)$ . Слід відзначити, що  $m(t)$  – дискретна функція, яка отримується у відповідності до лінійного рекурентного виразу, що отримано на основі М-послідовності максимальної довжини 1011 [106]. Даний багаточлен вибраний виходячи із необхідності, щоб основна частина спектру отриманого сигналу розташовувалась в межах частот для якого відомі характеристики РЕМ 0,4-10 кВ. Період повторення отриманої послідовності  $m(t)$  становить 16. Нехай тривалість одного елементу  $m(t)$  становить  $\tau$ . Тоді:

$$m(t) = m(n\tau) = m((n-1)\tau) + m((n-3)\tau) + m((n-4)\tau) \quad (2.50)$$

Прийнявши  $x(t) = 1$  і підставивши (2.50) в (2.49), отримаємо сигнал, що передається  $s(t)$ , графічне представлення якого наведено на рис. 2.8. Спектр сигналу  $s(t)$  представлений на рис. 2.9.

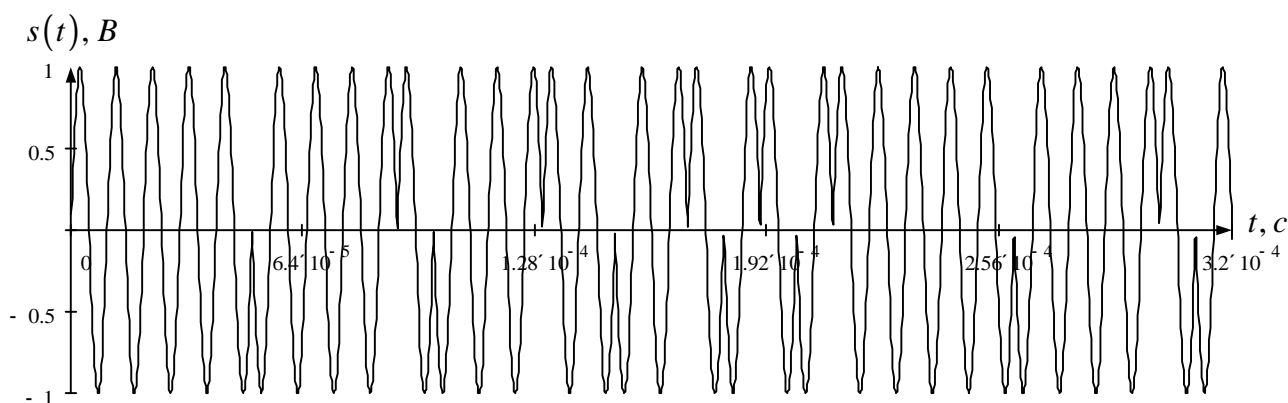


Рисунок 2.8 – ШПС для передачі по РЕМ 0,4...10 кВ

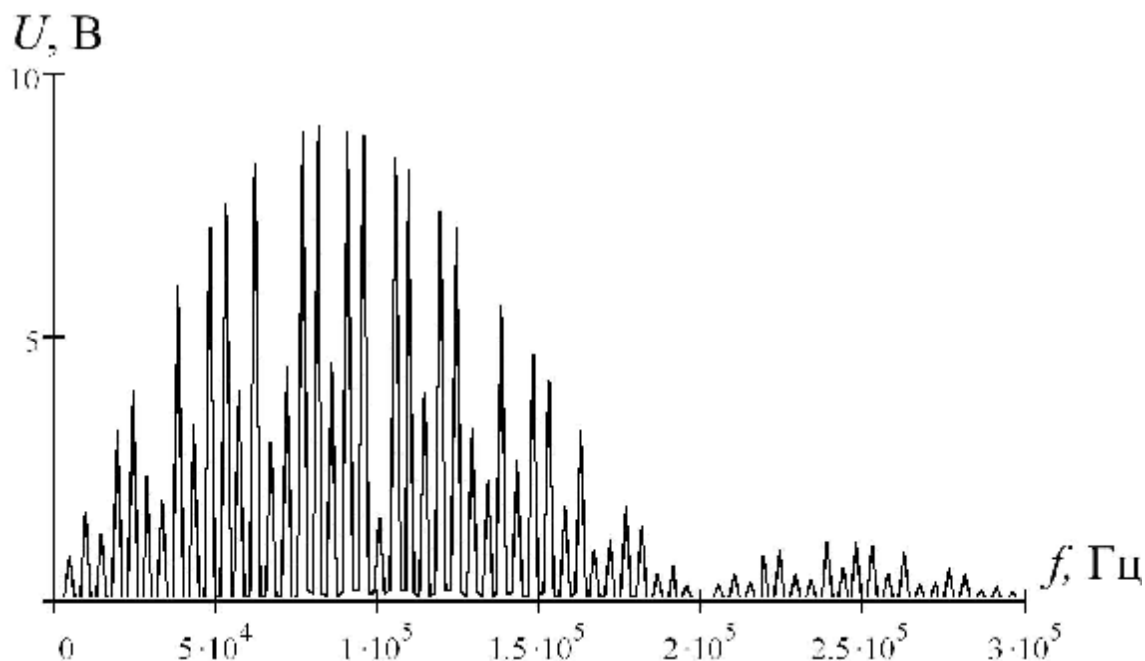


Рисунок 2.9 – Частотний спектр сигналу  $s(t)$

Для оцінки впливу АЧХ на процес передачі  $s(t)$  по РЕМ 0,4...10 кВ використано АЧХ ділянок РЕМ 0,4...20кВ, що отримані в результаті інших досліджень [79], які наведено на рис. 2.10.

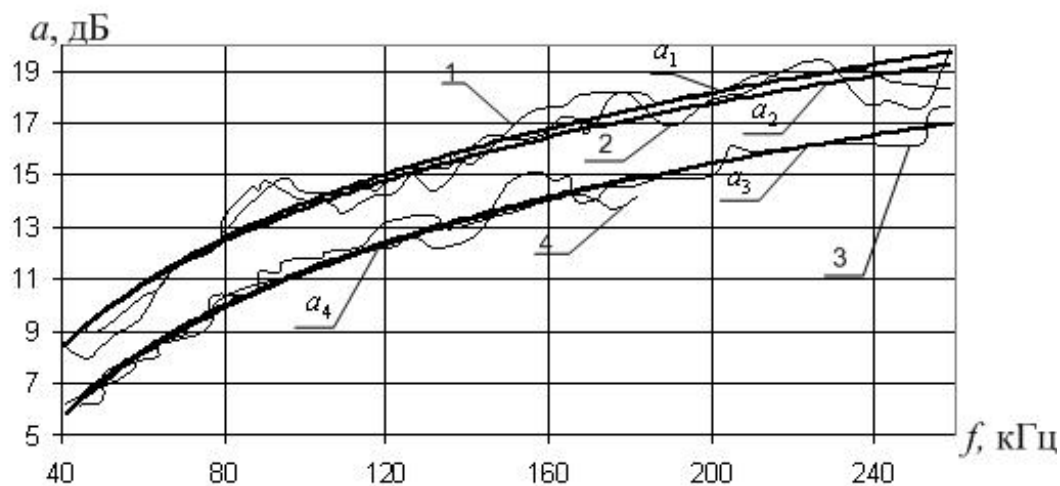


Рисунок 2.10 – АЧХ ділянок РЕМ 10 кВ: 1 – "чиста лінія"; 2 – на початку лінії включено трансформатор 1000кВА; 3 – в кінці лінії підключений вузол радіальних ліній; 4 – на початку лінії включено два трансформатори 1000кВА

Для проведення дослідження отримано аналітичні вирази для АЧХ РЕМ 20 кВ шляхом апроксимації кривих  $a(f)$ , які представлені на рис. 2.10. В результаті отримано наступні залежності АЧХ РЕМ 20 кВ

$$\begin{aligned} a_1(f) &= 6,067 \ln(f) - 14,002 & a_2(f) &= 5,7979 \ln(f) - 12,973 \\ a_3(f) &= 6,0549 \ln(f) - 16,642 & a_4(f) &= 5,9948 \ln(f) - 16,266 \end{aligned} \quad (2.51)$$

де  $a(f)$  – загасання сигналу в каналі по РЕМ 20 кВ, дБ,  $f$  – частота сигналу, кГц.

Графічне подання отриманих аналітичних залежностей представлено на рис. 2.10.

Для оцінки впливу АЧХ отримаємо спектр сигналу на виході РЕМ 10 кВ з спектру рис. 2.9 як

$$Y(k, f) = \frac{S(f)}{10^{\frac{a_k(f)}{20}}} \quad (2.52)$$

Графічне подання спектру отриманого сигналу на виході РЕМ 10 кВ із застосуванням  $a_1(f)$  представлено на рис. 2.11.

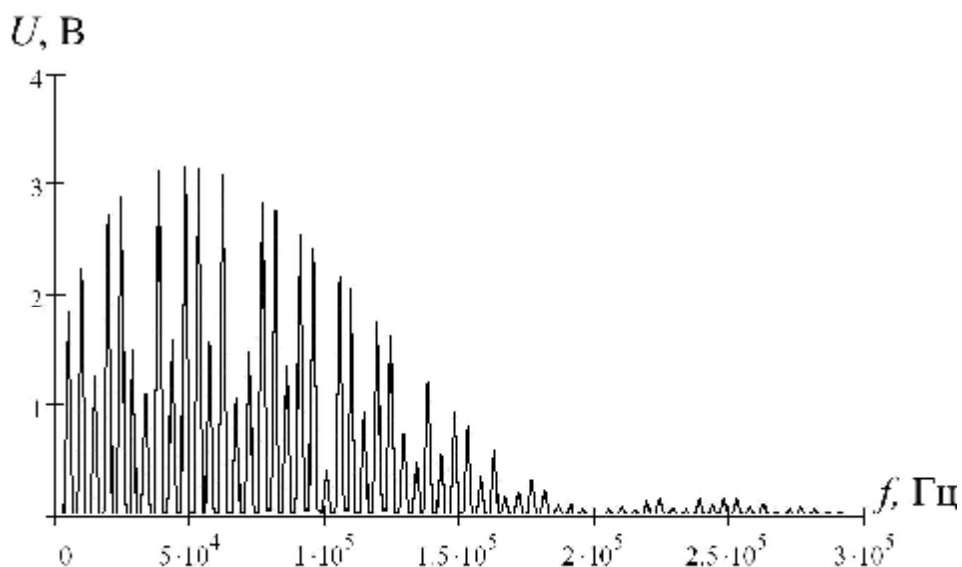


Рисунок 2.11 – Спектр отриманого сигналу  $Y(f)$  на виході РЕМ 10 кВ із застосуванням  $a_1(f)$

Застосувавши зворотне перетворення Фур'є, можна отримати форму сигналу на виході РЕМ 10 кВ. Форма отриманого сигналу на виході РЕМ 10 кВ із застосуванням  $a_1(f)$  представлено на рис. 2.12.

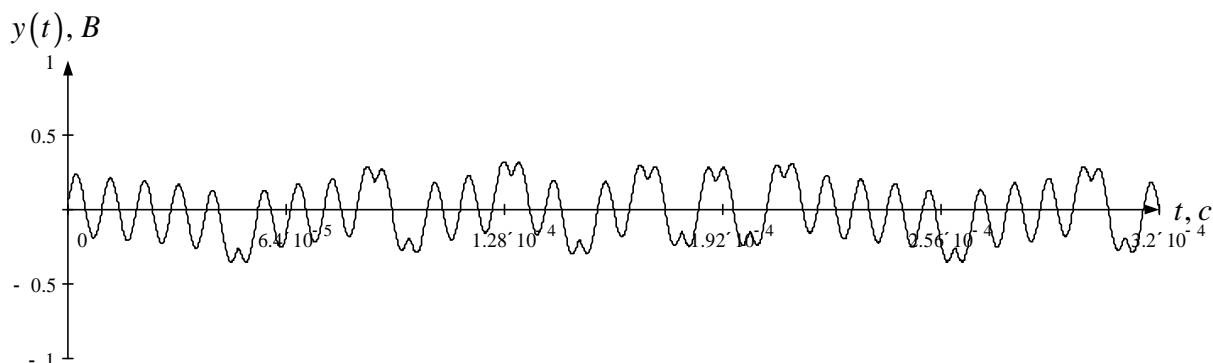


Рисунок 2.12 – ШПС на виході РЕМ 10 кВ із застосуванням  $a_1(f)$

Із застосуванням виразу (2.48) проведено розрахунок коефіцієнту кореляції між сигналом, що передавався по РЕМ 10 кВ та сигналом на виході РЕМ 20 кВ. Результати розрахунку коефіцієнта кореляції  $r$  представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти кореляції між сигналами що передавався та на стороні прийому

Вид АЧХ (рис. 2.10)	1	2	3	4
Коефіцієнт кореляції				
R	0,921	0,922	0,92	0,929

Аналіз отриманих результатів показав, що зміни значень коефіцієнта кореляції при застосуванні 4-х АЧХ РЕМ 20 кВ знаходиться в межах  $r = 0,92 - 0,929$ . Відхилення значення вільного члена апроксимованої АЧХ не призводить до суттєвої зміни значення коефіцієнта кореляції, тобто коефіцієнт кореляції слабо залежить від лінійної складової, а основний вплив здійснює нелінійна складова.

Оскільки відсутні ФЧХ для реальних РЕМ, то оцінку впливу ФЧХ на процес передачі сигналів по РЕМ здійснено шляхом моделювання для найбільш характерних ділянок РЕМ. При моделюванні елементи РЕМ представлялися П-подібними схемами заміщення, параметри яких визначені у відповідності з [125]. Прийнятий підхід не дозволяє отримати точні данні, оскільки для високочастотних сигналів РЕМ представляють собою лінії з розподіленими параметрами, але дозволяє оцінити ступінь впливу параметрів лінії на розповсюдження сигналів.

Використавши підхід визначення впливу характеристик РЕМ на процес передачі сигналів, який запропоновано при визначенні впливу АЧХ, отримано сигнал на стороні прийому після проходження РЕМ із дослідною ФЧХ, який предсталений на рис. 2.13 та проведено оцінку впливу ФЧХ РЕМ різної довжини на процес передачі ШПС, що представлена на рис. 2.14. АЧХ при цьому прийнята незалежною від частоти і дорівнює 1.

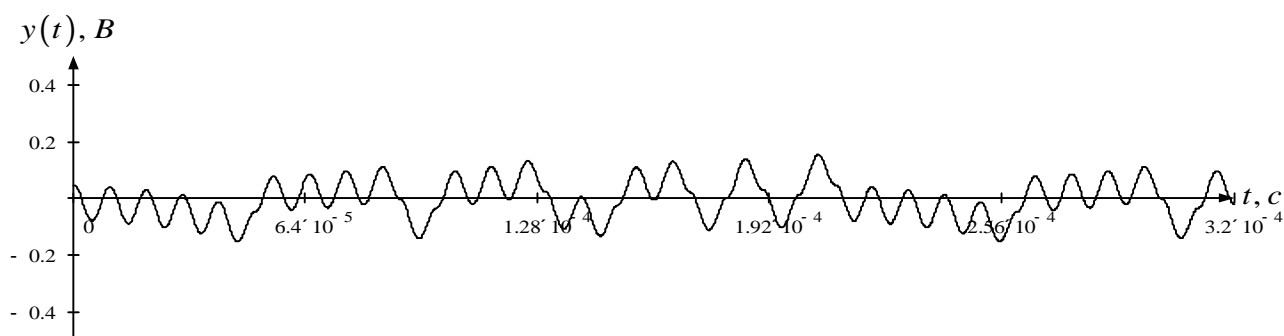


Рисунок 2.13 – ШПС на виході РЕМ після проходження РЕМ із дослідною ФЧХ

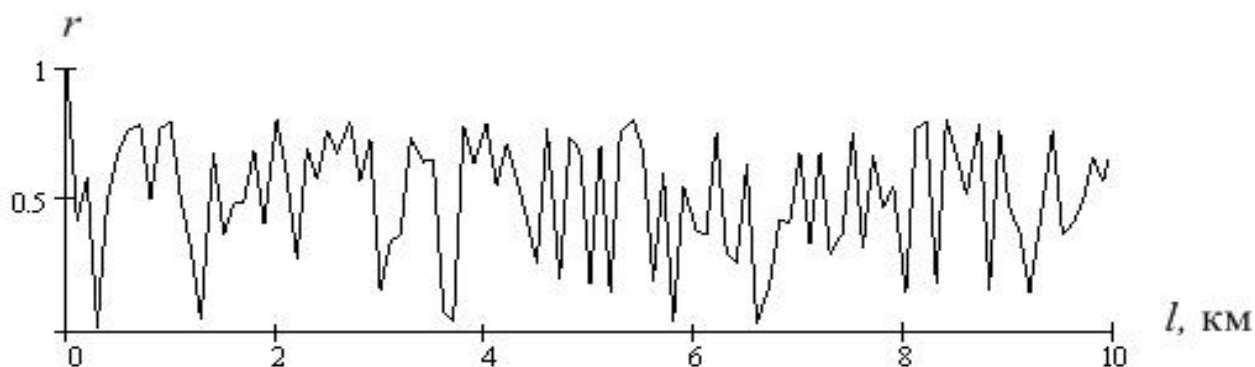


Рисунок 2.14 – Залежність коефіцієнта кореляції при моделюванні лінії різної довжини

Аналіз показав, що між коефіцієнтом кореляції і довжиною лінії нема явної залежності. Значення коефіцієнта кореляції  $r$  змінюються в повних межах від 0 до 1, причому  $r=1$  тільки при  $l=0$ . Такий розкид значень коефіцієнта кореляції обумовлює необхідність експериментального дослідження ФЧХ реальних РЕМ з подальшим уточненням впливу ФЧХ на процес передачі сигналів по РЕМ. Це дозволить розробити методи та засоби зниження впливу ФЧХ на процес передачі сигналів по РЕМ.

## **Висновки по розділу 2**

1. Встановлено, що до 10% енергії ШПС розміщено в бічних пелюстках спектру сигналу, які втрачаються при обмеженні спектру інформаційного сигналу полосою передачі.
2. На основі проведеного аналізу підходів по створенню ШПС розроблено новий метод формування ШПС із використанням додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити 99% енергії сигналу в заданій полосі передачі, що підвищує ефективність використання частотного діапазону РЕМ для передачі ШПС.
3. Для оцінки впливу АЧХ РЕМ на процес передачі ШПС був проведений аналіз впливу АЧХ нерозгалужених ділянок РЕМ на процес передачі ШПС, який показав незначний вплив АЧХ на процес передачі ШПС. Для розгалужених РЕМ з великою кількістю приєднань споживачів необхідно дослідити АЧХ реальних РЕМ для аналізу їх впливу на процес передачі ШПС.
4. Аналіз результатів дослідження впливу ФЧХ РЕМ на процес передачі ШПС, що проводилось на основі спрощеної моделі нерозгалуженої ділянки РЕМ, показав вплив ФЧХ на процес передачі ШПС, оцінка якого обумовлює необхідність дослідження ФЧХ реальних РЕМ.

### **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4...10 КВ ЯК СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ**

#### **3.1. Методика експериментального дослідження частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ**

Аналіз результатів досліджень РЕМ як середовища передачі сигналів показав, що тільки для деяких елементів РЕМ були встановлені частотні властивості [38, 79], також були встановлені АЧХ для РЕМ спеціального призначення (шахтні, гірничо-видобувні РЕМ та інші) [15, 79], отримано АЧХ ділянок міських РЕМ [15] та РЕМ сільськогосподарського призначення [79, 126], встановлені рівні завад [15, 56, 79, 126]. В той же час практично відсутні експериментальні дослідження РЕМ за умов передачі ШПС, особливо ФЧХ РЕМ, а також частотних характеристик РЕМ 0,4 кВ.

РЕМ 0,4...10 кВ як об'єкт експериментального дослідження має ряд особливостей. По-перше слід зауважити, що РЕМ 0,4...10 кВ призначені для передачі і розподілення електроенергії, що вимагає проведення дослідження на діючому об'єкті під напругою промислової частоти. В роботі під напругою неможливе безпосереднє вимірювання дослідних параметрів, це потребує використання вимірювальних перетворювачів і використання непрямих методів вимірювання, що ускладнює процес вимірювання і вносить додаткову похибку.

По-друге наявність великої кількості завад, що обумовлені як зовнішніми чинниками, такими як атмосферні явища, так і внутрішніми, обумовленими устаткуванням РЕМ і особливостями його роботи [15, 41, 42, 79]. До останніх слід віднести нелінійність та випадкова зміна навантаження, зокрема такого, що працюють в імпульсному режимі та двигунне навантаження.

Змінна топологія РЕМ також вносить суттєвий вплив на процес дослідження РЕМ 0,4...10 кВ, так як є одним із чинників, що безпосередньо впливає на характеристики.

Також слід відзначити територіальну розподіленість вузлів РЕМ, що вимагає рознесення передавальної та приймальної апаратури, що ускладнює їх синхронізацію [15, 40, 79].

На основі аналізу РЕМ 0,4-10 кВ України, який проведено в розділі 1, об'єктами експериментального дослідження обрано РЕМ 0,4-10 кВ п.г.т. Диканька та мережа 0,4 кВ кафедри АЕ корпусу №20 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», які є типовими РЕМ 0,4-10 кВ України.

Джерелами живлення п.г.т. Диканька є трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ закритого та відкритого типів, що рівномірно розподілені по території п.г.т. Диканька. Потужність трансформаторів становить 63-400 кВА.

Навантаження РЕМ в основному складають одноповерхові індивідуальні садиби та двоповерхові будинки на декілька квартир, навантаження яких має побутовий характер (холодильники, бойлери, аудіо-відео апаратура, персональні комп'ютери і т.д.). У індивідуальних садибах зустрічається двигуне навантаження 0,5-3 кВт.

Серед енергоємних комунальних та промислових споживачів слід відзначити маслозавод – 50-60 кВт; хлібзавод – 30-50 кВт; пошта, ресторан – 20-40 кВт. Потужність решти комунальних об'єктів знаходиться в межах 5-15 кВт.

Лінії переважно повітряні п'ятипровідні (3 фази, 0-й провід та провід зовнішнього освітлення). Провода в основному алюмінієво-сталеві типу ЗА25. Висота підвішування – біля 6 м.

Для досліджень обрано РЕМ 0,4-10 кВ п.г.т. Диканька, що живиться від ЗТП №8 та ЗТП №7. Поопорні схеми електропостачання ЗТП №8 для фідерів 1 та 2, де розташовувались дослідні ділянки наведено в додатку А на рис. А.1 – рис. А.3.

На ЗТП №8 встановлено трансформатор ТМ-400/10 потужністю 400 кВА із первинною напругою 10 кВ та вторинною – 0,4 (0,23) кВ. Схема з'єднань



обмоток трансформатора  $Y/Y_0$ . ЗТП-8 живить 6 фідерів, один з яких є резервним. Споживачами ЗТП-8 є маслозавод і ряд вулиць п.г.т. Диканька. Обраний фрагмент є найбільш потужним і розгалуженим фрагментом п.г.т. Диканька із струмом навантаження близько 500А. Приєднання 1, 2, 3 живлять побутових споживачів по повітряних лініях, а приєднання 4 і 5 живлять маслозавод по кабельних лініях.

Загальна протяжність ліній, що живить ЗТП-8 складає 2960 м. Найбільш довга лінія від ЗТП-8 становить 920 м.

Загальна кількість споживачів ЗТП-8 становить 144 абонента.

Дослідження процесу передачі сигналів із мережі 0,4 кВ в мережу 10 кВ проводилося на основі мережі електроживлення КТП-9 та КТП-10, спрощена схема яких представлена в додатку А на рис. А.4.

КТП-9 обладнана трансформатором типу РТКВ-160/10 потужністю 160 кВА 1976р випуску з первинною напругою 10 кВ та вторинною – 380/220 В. Схема з'єднання обмоток  $Y/Y_0$ . Первинний струм  $I_1 = 9,24$  А, вторинний струм  $I_2 = 490$  А. КТП-9 має 4 фідера, що живлять лікарню, комбінат побутових виробів та 2 фідера, що живлять побутових споживачів по вул. Держинського, вул. Пушкіна та вул. Чернишевського.

Загальна довжина мережі становить 3440 м, причому мережа приєднання №2, що живить комбінат побутових виробів виконана повітряною кабелем 4А26 і кабелем ГРШЕ. Довжина повітряної ділянки становить 140 м, кабельної – 380 м.

КТП-10 обладнана трансформатором типу ТМ-63/10 потужністю 63 кВА з первинною напругою 10 кВ та вторинною – 380/220 В. Схема з'єднання обмоток  $Y/Y_0$ .

КТП-10 має всього 2 фідера. Перший живить кафе-ресторан, причому перша ділянка до опори є повітряна довжиною 6 м, а далі 25 м кабелем ГРШЕ. Другий живить хлібзавод. Лінія є повітряною, прокладена проводом 4А35.

Для дослідження повного вхідного опору електричної мережі використано метод трьох вольтметрів [38, 39, 79, 123], який дозволяє проводити дослідження в мережах із значним рівнем завад. Комплекс вимірювальних засобів представлена в додатку А на рис. А.5.

Разом із тим зміна вхідного опору мережі в широких межах вимагає необхідність мати можливість зміни опорів  $R_1$  та  $R_2$  (додаток А рис. А.5) в процесі проведення вимірювань.

Для захисту генератора від напруги промислової частоти розроблено фільтр приєднання з параметрами  $C = 1,793 \text{ мкФ}$ ,  $L = 5,65 \text{ Г}$ , при цьому його хвильовий опір становить  $1,75 \text{ Ом}$ , а еквівалентний опір резонансної частоти  $R_{e0} = 18555 \text{ Ом}$ . Опір  $R_c$  разом із базисними опорами дозволяє отримати режим узгодженого навантаження, а також захистити вихід генератора від пененапруг при перехідних процесах.

Для зниження напруги РЕМ до безпечного для вольтметра рівня використано дільник напруги, що зібрані на двох опорах за схемою в додатку А рис. А.6.

Схема в додатку А рис. А.6.а була використана для приєднання дослідної установки до РЕМ на частотах до  $150 \text{ кГц}$ , а схема в додатку А рис. А.6.б на частотах  $150\text{-}1000 \text{ кГц}$ .

В якості вольтметрів використано селективні вольтметри В6-1 та В6-9, які забезпечують достатню вибірковість із сталою полосою пропускання у всьому діапазоні частот, що досліджувались. Однак ці прилади є приладами із несиметричними входами, що робить неможливим вимірювання ним напруги безпосередньо на базисному опорі. У зв'язку із цим виникла необхідність в додатковому аналізі дослідної схеми з метою визначення повного, активного і реактивного опорів РЕМ з урахуванням немиметричності входів, який дозволив отримати вирази (3.1)

$$R = \frac{1}{2} \frac{a^2 R_2^2 - R_0^2}{R_0 - a^2 R_2} \quad (3.1)$$

$$X = \sqrt{\frac{b U_3^2}{U_2^2 - U_3^2} - \frac{1}{4} \frac{a b}{R_2} - R_2} \quad (3.2)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.3)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} \quad (3.4)$$

де  $a^2 = \frac{U_1^2 - U_3^2}{U_2^2 - U_3^2}$ ;  $R_0 = R_1 + R_2$ ;  $b = \frac{R_0 R_1 R_2}{a^2 R_2 - R_0}$ .

$U_1$  – потенціал базисного  $R_1$  опору по відношенню до землі;

$U_2$  – потенціал базисного  $R_2$  опору по відношенню до землі;

$U_3$  – потенціал дослідної точки по відношенню до землі.

При дослідженні використано приєднання по схемі фаза-земля, схему якого наведено в додатку А на рис. А.7. Схемою передбачена можливість підключення генератора сигналів до одного із фазних проводів або 0-го проводу за допомогою перемикача П1 на стороні передачі. На стороні прийому аналогічний перемикач, що дозволяє підключати підключення приймача до однієї із фаз або 0.

Для приєднання приймально-передавальної апаратури до лінії 0,4 кВ для сумісного вимірювання рівня передачі за напругою та струмом використано схему, що наведена в додатку А на рис. А.7.

Прийнята схема дозволяє провести дослідження рівня передачі сигналів по напрузі при підключенні джерела сигналів як до одноіменних так і до різноіменних фаз або нульового проводу, що дозволило дослідити процес передачі сигналу з фази на фазу або 0-й провід. Для підключення селективного вольтметра до ТС в схему введено перемикач П2 та П3.

Дослідження проходження сигналу із мережі 0,4 кВ в мережу 10 кВ проводили по схемі в додатку А на рис. А.8, де Т1 та Т2 – силові трансформатори ТП 10/0,4 кВ. Решта позначень відповідають позначенням в додатку А на рис. А.7.

У всіх дослідженнях перед подачею сигналу в електричну мережу в точці прийому проводилося вимірювання рівня завад за напругою і струмом в кожній з фаз та нульовому проводі.

Дослідження рівнів передачі виконувались із використанням прийнятої методики за умов різного приєднання приймально-передавальної апаратури. Разом із цим проводилися виміри рівнів завад в дослідному діапазоні частот.

Дослідження проводились у відповідності до прийнятої схеми (додаток А рис. А.7) між різними точками дослідної схеми.

Для дослідження ФЧХ обрано РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Живлення РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» здійснюється від КТП 10 кВ, що розташовано на цокольному поверсі будівлі, в якому встановлено 2 силових трансформатори 10/0,4 кВ потужністю 1000 кВА кожний.

Дослідний фрагмент РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» представлений в додатку А на рис. А.9. Електричні з'єднання дослідного фрагменту РЕМ виконані проводом АПВ-660. Основне навантаження мережі складає офісна комп'ютерна та оргтехніка і люмінесцентне освітлення навчальних аудиторій, але до складу РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» також входять і спеціалізовані учбові і дослідні лабораторії, які мають інші види навантаження, зокрема двигунне навантаження.

В рамках дослідження РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» дослідної мережі обрано 3 дослідних тракти:

- тракт №1 між розетками XS-306.2 та XS3-06.1 в 306 аудиторії (довжина 7 м);

- тракт №2 між розетками XS-308.1 в 308 аудиторії та XS-306.1 в 306 аудиторії (довжина 30 м);
- тракт №3 між розетками XS-327.1 в 327 аудиторії та XS-327.3 в 327 аудиторії (довжина 15 м).

Для дослідження ФЧХ запропоновано нову методику, що дозволяє проводити дослідження ФЧХ РЕМ за умов віддаленості точок передачі та прийому.

Запропонований метод, побудований на принципі вимірювання відносного зсуву фаз між сигналами, що передаються на різних частотах, які зфазовані на стороні передачі.

В загальному вигляді сумарний періодичний сигнал  $s(t)$ , рівний сумі двох сигналів з частотами  $w_1$  та  $w_2$  має вигляд:

$$s(t) = A_{m1}e^{j(w_1t+j_1)} + A_{m2}e^{j(w_2t+j_2)}, \quad (3.5)$$

де:  $A_{m1}, A_{m2}$  – амплітуди першого та другого сигналу;  $j_1, j_2$  – початкові фази першого та другого сигналу. Нехай на стороні передачі дані сигнали мають  $j_1 = j_2 = 0^\circ$ , а також  $A_{m1} = A_{m2}$ . Тоді сумарний сигнал  $s(t)$  рівний

$$s(t) = A_{m1}e^{j(w_1t)} + A_{m2}e^{j(w_2t)} \quad (3.6)$$

Миттєві значення фаз першого та другого сигналу, після проходження через РЕМ сумарного сигналу, становить:

$$y_1 = w_1 \times t + Dj_1 \quad (3.7)$$

$$y_2 = w_2 \times t + Dj_2 \quad (3.8)$$

де  $Dj_1, Dj_2$  – абсолютний зсув фаз першого та другого сигналу відповідно.

Аналізуючи швидкість обертання миттєвих фаз першого та другого сигналу, спостерігаємо, що вона різна для фаз кожного із сигналів та залежить від  $w_1$  та  $w_2$ .

З рівняння (3.7) отримаємо:

$$t = \frac{y_1}{w_1} - \frac{Dj_1}{w_1} \quad (3.9)$$

Підставивши (3.9) в (3.8), отримаємо:

$$\frac{w_2}{w_1} y_1 - y_2 = \frac{w_2}{w_1} D j_1 - D j_2 \quad (3.10)$$

або

$$D y_{1,2} = \frac{f_2}{f_1} y_1 - y_2 = \frac{f_2}{f_1} D j_1 - D j_2 \quad (3.11)$$

де  $D y_{1,2}$  – відносний зсув фаз між першим та другим сигналом після проходження через РЕМ.

Відносний фазовий зсув  $D y_{2,3}$  між сигналами з частотами  $f_2$  та  $f_3$  відповідно:

$$D y_{2,3} = \frac{f_3}{f_2} y_2 - y_3 = \frac{f_3}{f_2} D j_2 - D j_3 \quad (3.12)$$

Отже, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} D y_{1,2} = \frac{f_2}{f_1} y_1 - y_2 = \frac{f_2}{f_1} D j_1 - D j_2 \\ D y_{2,3} = \frac{f_3}{f_2} y_2 - y_3 = \frac{f_3}{f_2} D j_2 - D j_3 \\ \vdots \\ D y_{n,(n+1)} = \frac{f_{n+1}}{f_n} y_n - y_{n+1} = \frac{f_{n+1}}{f_n} D j_n - D j_{n+1} \end{cases} \quad (3.13)$$

де  $D y_{n(n+1)}$  є експериментально отримані дані відносних зсувів фаз двох гармонійних сигналів. Відповідно маємо систему  $N$  – рівнянь з  $(N+1)$  невідомими, що не дозволяє отримати єдиний розв'язок.

Розв'язання системи (3.13) та отримання ФЧХ можливе за умови фіксації одного із коренів системи (3.13), тобто прийнявши абсолютний фазовий зсув однієї із частот  $f_k$  як  $D j_k = const$ , і розглядати інші корені відносно зафіксованого кореня. Тобто розглядати не абсолютну ФЧХ, а відносну ФЧХ. Зручно фіксувати  $f_1$  і приймати  $D j_1 = 0$ .

Тоді система рівнянь (3.13) прийме вигляд:

$$\begin{aligned}
 & \vdots \\
 & \vdots D_{j_1} = 0 \\
 & \vdots D_{j_2} = -Dy_{1,2} \\
 & \vdots D_{j_3} = \frac{f_3}{f_2} D_{j_2} - Dy_{2,3} \\
 & \vdots L L L L L L L L L L L L L L L L \\
 & \vdots \\
 & \vdots D_{j_{n+1}} = \frac{f_{n+1}}{f_n} D_{j_n} - Dy_{n,(n+1)} \\
 & \uparrow
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Розв'язок системи рівнянь (3.14) дає відносну ФЧХ РЕМ в діапазоні частот  $[f_1, f_{n+1}]$  відносно фази сигналу з частотою  $f_1$ .

Розроблений метод не дозволяє визначити точну ФЧХ для будь-якої точки дослідного частотного діапазону, а тільки для конкретних точок дослідного частотного діапазону, що відрізняються за частотою в два рази. Таким чином метод дозволяє отримати відносну ФЧХ РЕМ без урахування резонансних частот, які створюють провали в частотному спектрі, але при цьому метод дозволяє здійснити дослідження ФЧХ між вузлами РЕМ, що розташовані на значних відстанях одна від одної, що особливо актуально у випадку дослідження ФЧХ розподільних мереж.

Для реалізації запропонованого підходу для дослідження ФЧХ розроблена дослідна схема, блок-схема якої наведена на рис. 3.1.

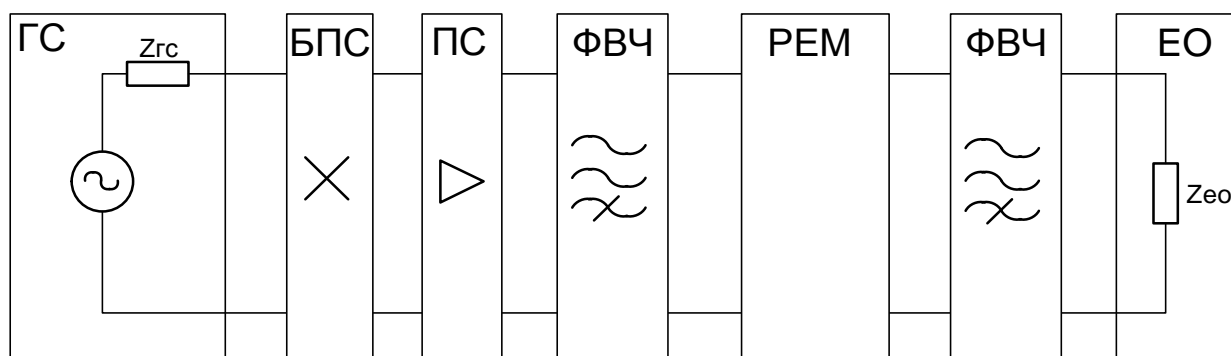


Рисунок 3.1 – Блок-схема досліду ФЧХ РЕМ 0,4-10 кВ

Комплект необхідних засобів для вимірювання ФЧХ обраний у відповідності з отриманням необхідної точності виміру [60, 127], та включає:

- генератор сигналів (ГС) типу GFG-8216A виробництва Instek;

- блок перемноження сигналів (БПС);
- підсилювач сигналів (ПС);
- фільтри верхніх частот/фільтр приєднання (ФВЧ/ФП);
- двоканальний електронний осцилограф (ЕО) типу GDS-806S виробництва Instek.

ФВЧ/ФП являє собою схему, що виконує функції як фільтра верхніх частот, так і здійснює гальванічне розв'язування мережі 220 В та осцилографа. Схема фільтра показана, що використовувався при дослідженнях представлено в додатку А на рис. А.10.

ФВЧ/ФП складається з трансформатора зв'язку Т1 та конденсаторів С1 і С2. Оскільки співвідношення витків первинної і вторинної обмоток трансформатора зв'язку рівне 1:1, то коефіцієнт трансформації  $K_T=1$ .

За частоту зрізу прийнято  $f_3=1$  кГц, навантаження мережі складає  $Z_n=20$  Ом [105], на підставі цих даних розраховано параметри фільтра приєднання. Зокрема  $C1=1$  мкФ,  $C2=470$  нФ,  $L1=2,3$  мГн, оскільки співвідношення витків первинної і вторинної обмоток 1:1, то коефіцієнт взаємодуції  $M=1$ .

Для проведення досліджень розроблено спеціальний підсилювач гармонійних сигналів, який працює до 1000 кГц на навантаження 20 Ом, принципова схема якого представлена в додатку А на рис. А.11.

Для отримання зфазованих гармонійних сигналів використано принцип множення гармонійного сигналу сам на себе. Тобто у відповідності до виразу (3.15) в результаті перемноження гармонійного сигналу сам на себе ми отримуємо сигнал подвоєної частоти і постійну складову.

$$\sin(x)\sin(x) = \frac{1 - \cos(2x)}{2} = \frac{1}{2} - \frac{\sin\left(2x + \frac{\pi}{2}\right)}{2} \quad (3.15)$$

Відповідно для отримання зфазованого коливання подвоєної частоти необхідно помножити гармонійний сигнал сам на себе і прибрати постійну складову. Модель такого підходу представлена на рис. 3.2.



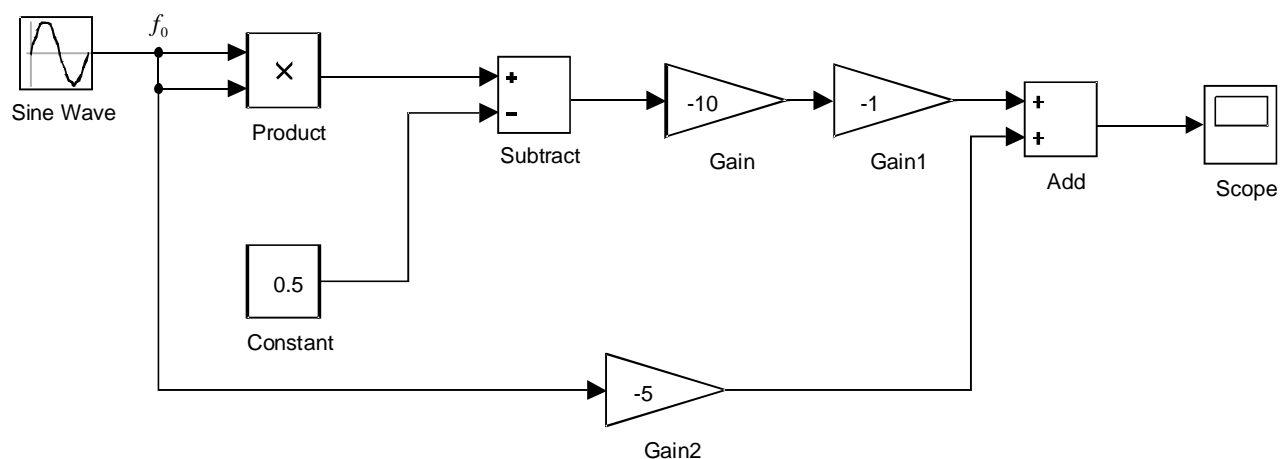


Рисунок 3.2 – Модель блоку отримання сигналу для передачі по РЕМ

В результаті на виході моделі блоку отримання сигналу для передачі по РЕМ (рис. 3.2) ми отримаємо сигнал  $s(t)$ , що представлено на рис. 3.3.

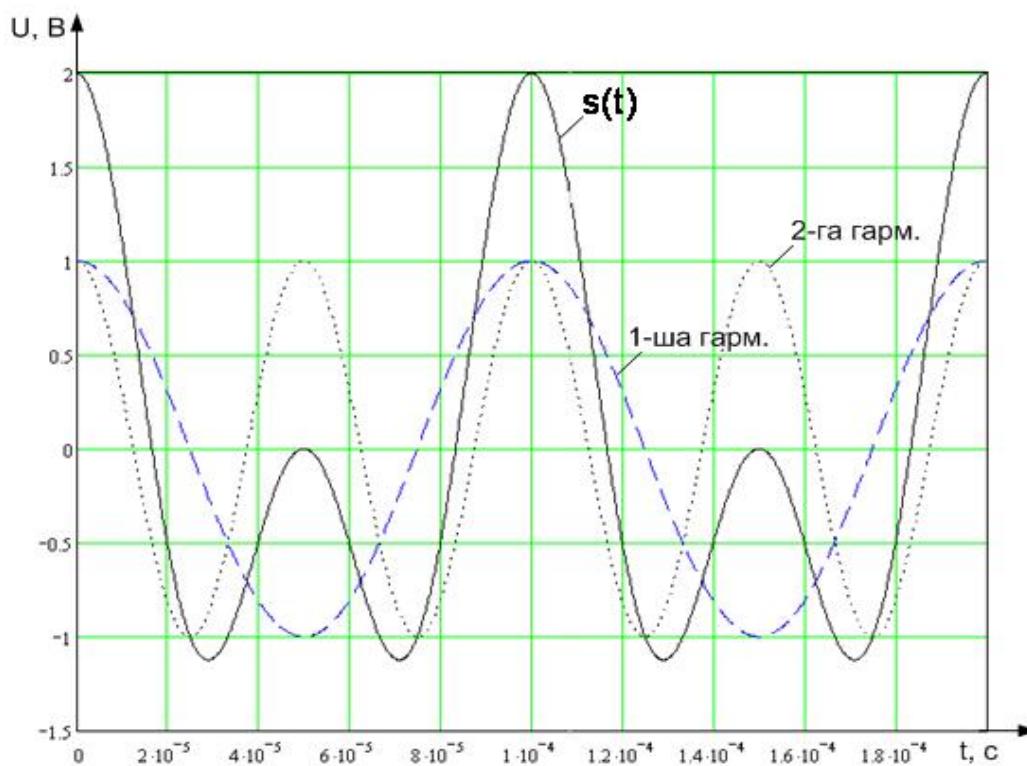


Рисунок 3.3 – Сигнал  $s(t)$  для частоти  $f_0 = 10 \text{ кГц}$

Принципові схема, що фізично реалізує модель рис. 3.2 представлена в додатку А на рис. А.12.

Враховуючи особливість запропонованого методу, а саме подвоєння частоти для кожної наступної точки для охоплення частотного діапазону до

1000 кГц, для проведення дослідження обрано нижню межу 10 кГц. Таким чином частотний діапазон становитиме 10...1280 кГц.

Вимірювання отриманого сигналу на стороні прийому здійснювалося цифровим осцилографом GDS-806S, який дозволяє записати дискретизований сигнал і передати його в ПК для проведення аналізу числовими методами.

Зокрема цифровий осцилограф GDS-806S автоматично виконував перетворення експериментальних даних з аналогової форми в цифрову з дискретизацією 500 точок на реєстрований період  $T_{co}$ , що в результаті складало від 167 до 313 точок на період  $T_{cuz}$  сигналу  $s(t)$  залежно від частоти сигналу. Це дало можливість з достатньою точністю наблизитися до відтворення неперервного процесу. Вихідні дані з електронного осцилографа через USB, використовуючи програмне забезпечення для роботи з осцилографом FreeCapture, передавались в ПК. За допомогою розробленого програмного забезпечення CSVConvert проводилось перетворення даних в формат, придатний для завантаження в програмний комплекс Microsoft Excel.

Отримання фазового зсуву здійснювалось шляхом розкладання отриманого сигналу в ряд Фур'є в середовищі Matlab у відповідності до (3.16).

$$c_n = |c_n| e^{jy_n} = \frac{1}{T_{cuz1}} \int_{\frac{T_{cuz1}}{2}}^{\frac{T_{cuz1}}{2}} \bar{s}_1(t) e^{jn\omega t} dt \quad (3.16)$$

де  $|c_n|$  – амплітуда  $n$ -ої гармоніки;  $y_n$  – початкова фаза  $n$ -ої гармоніки.

Визначивши у відповідності до (3.16) комплексні коефіцієнти  $c_n$ , можна отримати початкові фази  $y_n$ .

Нехай  $y_1$  фаза першої гармоніки, а  $y_2$  – фаза другої гармоніки. Тоді фазовий зсув між першою та другою гармоніками  $y_{1,2}$  сигналу  $\bar{s}(t)$  можна отримати як:

$$y_{1,2} = \frac{f_2}{f_1} y_1 - y_2 = 2y_1 - y_2 \quad (3.17)$$

де  $f_2 = 2f_1$ .

Аналогічно визначаємо відносні фазові зсуви  $y_{2,4}, y_{4,8}, K, y_{64,128}$ .

Для перевірки розробленої методики проведено дослідження ФЧХ РЕМ 0,4 кВ невеликої довжини (близько 7 м), який дозволяв прокласти додатковий кабель, по якому передавався зразковий сигнал. Це дозволяло виміряти реальну ФЧХ між двома точками РЕМ традиційним і розробленим способами. Відповідно блок-схема досліду представлена на рис. 3.4.

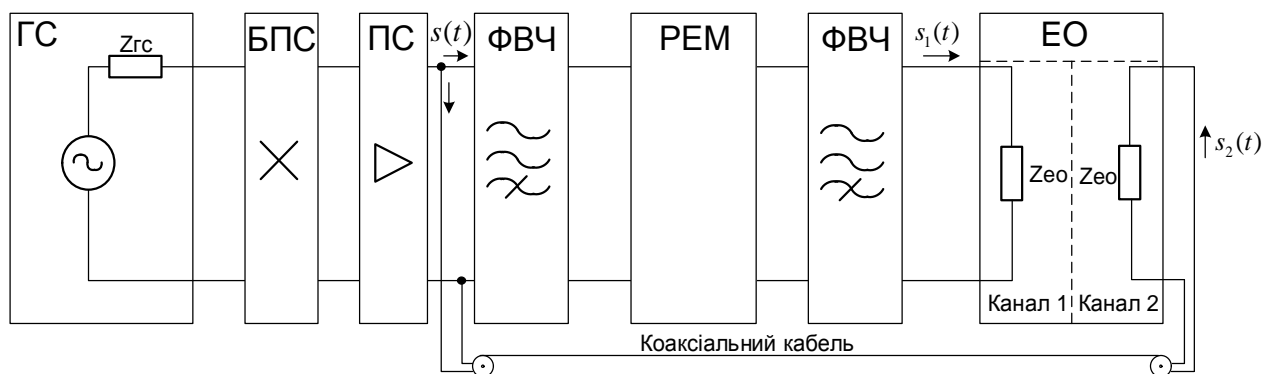


Рисунок 3.4 – Блок-схема вимірювання ФЧХ РЕМ 0,4-10 кВ

Сигнал  $s(t)$  з виходу підсилювача сигналів через фільтри та РЕМ подається на вхід першого каналу осцилографа, а через коаксіальний кабель подається на вхід другого каналу. Осцилограф одночасно фіксує сигнали  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$  на вході першого та другого каналу відповідно і дозволяє отримати масив дискретизованих значень по двох каналах.

Отримані числові ряди розкладалися в ряд Фур'є згідно запропонованого способу дослідження у відповідності до виразу (3.16), що дає відносну ФЧХ двох трактів (по РЕМ та по коаксіальному кабелю). Різниця миттєвих фаз основних гармонік визначає фазовий зсув між сигналами  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$  на частоті  $f_n$ .

$$D_j(f) = y_{s_1}(f) - y_{s_2}(f) \quad (3.18)$$

Оскільки коаксіальний кабель має свою ФЧХ, яка в загальному випадку не дорівнює 0, то для коректної оцінки ФЧХ необхідне дослідження ФЧХ коаксіального кабелю з метою внесення корекції в отримані результати. ФЧХ РЕМ з фільтрами приєднання визначається як:

$$D_j^{PEM}(f) = y_{s_1}^{PEM}(f) - y_{s_2}^{PEM}(f) \quad (3.19)$$

ФЧХ коаксіального кабелю визначається як:

$$Dj^{каб}(f) = y^{каб}_{вих}(f) - y^{каб}_{вх}(f) \quad (3.20)$$

Для випадку дослідної схеми рис. 3.4, отримаємо:

$$\begin{aligned} y^{каб}_{вх}(f) &= y^{PEM}_{вх}(f) \\ y^{PEM}_{вих}(f) &= y_1(f) \\ y^{каб}_{вих}(f) &= y_2(f) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Виразивши рівняння (3.20) через  $y^{каб}_{вх}(f)$  та підставивши в рівняння (3.19), отримаємо ФЧХ дослідного тракту з фільтрами ФВЧ:

$$\begin{aligned} Dj^{PEM}(f) &= y^{кнд}_{вих}(f) - y^{каб}_{вих}(f) + Dj^{каб}(f) = \\ &= y_1(f) - y_2(f) + Dj^{каб}(f) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Із рівняння (3.22) бачимо, що ФЧХ дослідного тракту з фільтрами дорівнює сумі ФЧХ коаксіального кабелю та ФЧХ між сигналами  $s_1(t)$  та  $s_2(t)$  на входах осцилографа. ФЧХ коаксіального кабелю, яка отримана експериментальним шляхом, представлена на рис. 3.5.

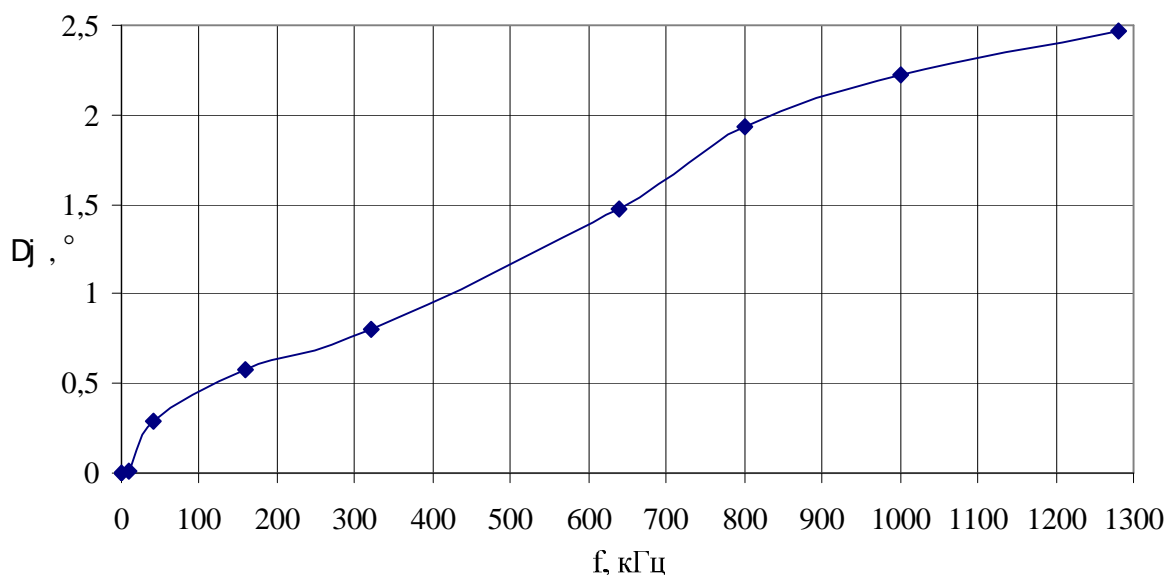


Рисунок 3.5 – ФЧХ коаксіального кабелю

Аналіз залежності на рис. 3.5 показав, що ФЧХ коаксіального кабелю не перевищує 2,5°. Оцінка його впливу на результати дослідження ФЧХ буде

зроблена при експериментальних дослідженнях ФЧХ РЕМ в розділі 3.2.4, серед яких присутній зразковий дослід дослідного тракту.

### **3.2. Результати дослідження частотних характеристик розподільних електричних мереж 0,4...10кВ**

#### **3.2.1 Аналіз результатів дослідження повного вхідного опору розподільних електричних мереж 0,4...10кВ**

Дослідження характеристик РЕМ с.м.т. Диканька проводилися в декількох точках РЕМ с.м.т. Диканька. Зокрема результати вимірювання повного опору на шинах ЗТП-8 (т.1 додаток А рис. А.1) наведені на рис. 3.6 та рис. 3.7. Дослідження вхідного опору РЕМ показали, що характер зміни повного вхідного опору РЕМ  $Z$  має схожий характер для всіх трьох фаз і збільшується від 1-3 Ом на частотах від 1-100 кГц до 8 Ом для фази  $C$  і 16-18 Ом для фаз  $A$  і  $B$  на частоті 1000 кГц. Максимальне значення 21,53 Ом отримано для фази  $B$  на частоті 780 кГц. Слід зауважити, що наявність провалу вхідного опору  $Z$  на частоті 50 кГц, що може бути обумовлено резонансом в мережі.

Частотні характеристики  $z$ ,  $r$ ,  $x$ , та  $j$  не мають чіткої залежності і характеризуються рядом екстремумів, що свідчить про наявність резонансних частот дослідної мережі, що відповідають резонансам струмів та напруг.

При цьому слід зауважити, що реактивна складова опору лінії  $x$  після мінімуму на частотах від 360 кГц до 660 кГц зростає в 4,15 рази по закону близькому до лінійного, після чого спостерігається коливання  $x$  відносно значень 32-36 Ом.



Рисунок 3.6 – Залежність модуля вхідного опору РЕМ на шинах ЗТП-8 від частоти

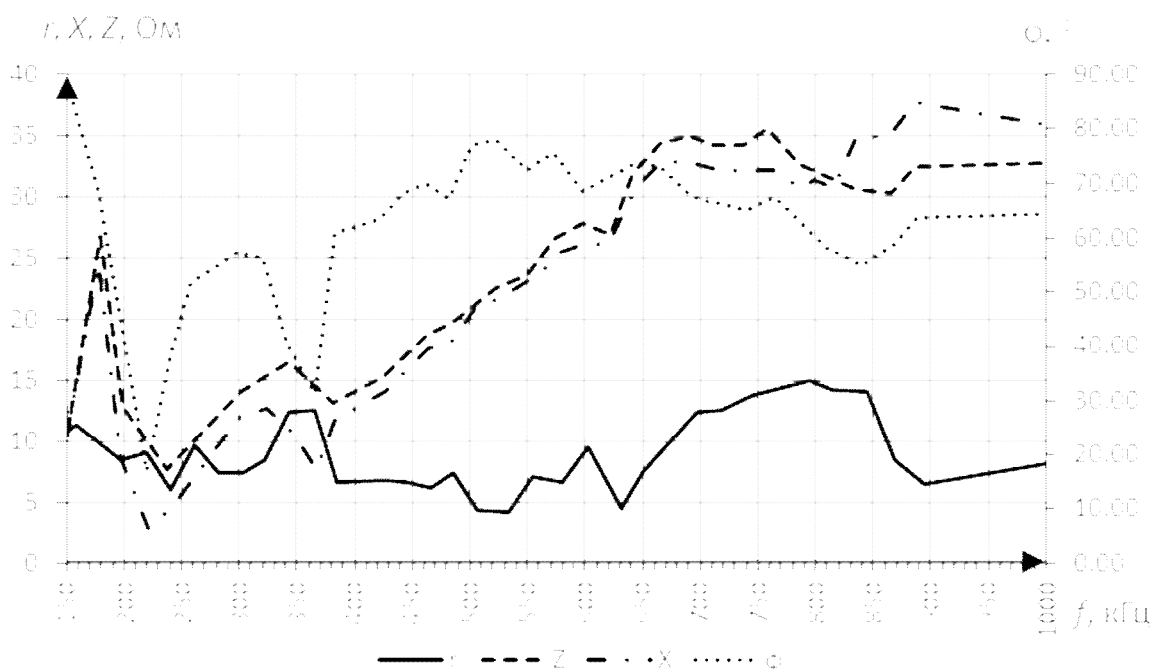


Рисунок 3.7 – Залежність комплексних складових вхідного опору РЕМ на шинах ЗТП-8 від частоти

Дослідження повного вхідного опору всіх фаз фідера №1 ЗТП-8 із боку споживача (т.2 додаток А рис. А.1) представлено на рис. 3.8. Аналіз показав наявність двох резонансів струмів на частотах 9 кГц і 288 кГц і різке зростання опору після резонансу напруг на частотах 445 кГц і 50 кГц. Зміна повного опору відбувається в межах 1-56 Ом.

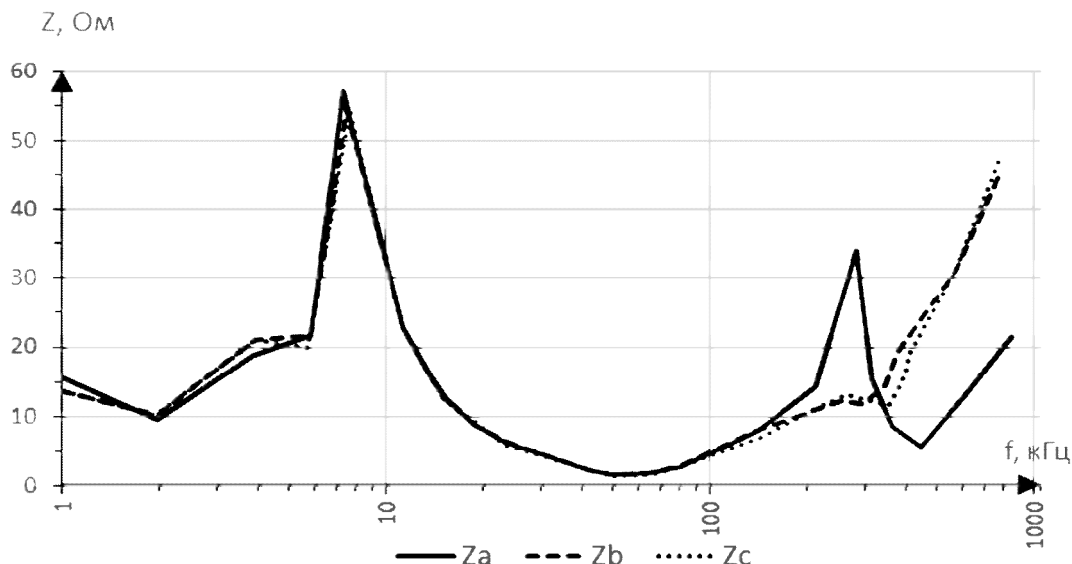


Рисунок 3.8 – Залежність модуля вхідного опору РЕМ ЗТП-8 з боку споживача від частоти

На рис. 3.9 – рис. 3.11 представлено залежності  $z$ ,  $r$ ,  $x$ , та  $j$  всіх 3-х фаз фідера №1 ЗТП-8 із боку споживача (т.2 додаток А рис. А.1), аналіз яких показав наявність резонансу струму на частоті 9 кГц, при цьому реактивний опір є мінімальним, а активний опір досягає свого максимального значення.

На частотах 1-230 кГц спостерігається всього два резонанси, а саме резонанс струмів на частоті 9 кГц і резонанс напруг на частоті 50 кГц. Для фази А також слід відмітити наявність резонансу струмів на частоті 280 кГц, при цьому для фаз В та С на тій же частоті спостерігається незначне зниження величини вхідного опору.

В частотному діапазоні 7-9 кГц спостерігається максимум значення вхідного опору для всіх трьох фаз, причому його значення доходить до 50-81 Ом. На частоті 70 кГц опір прямує до 0, що свідчить про резонанс напруг. Для фази

А вхідний опір на частоті 350 кГц сягає 63 Ом, в той час як для інших фаз на цій частоті опір не перевищує 10-13 Ом. При частотах більше 425 кГц вхідний опір мережі зростає майже по лінійному закону для фаз В, С від 10 Ом до 42 Ом на частоті 1000 кГц відповідно.

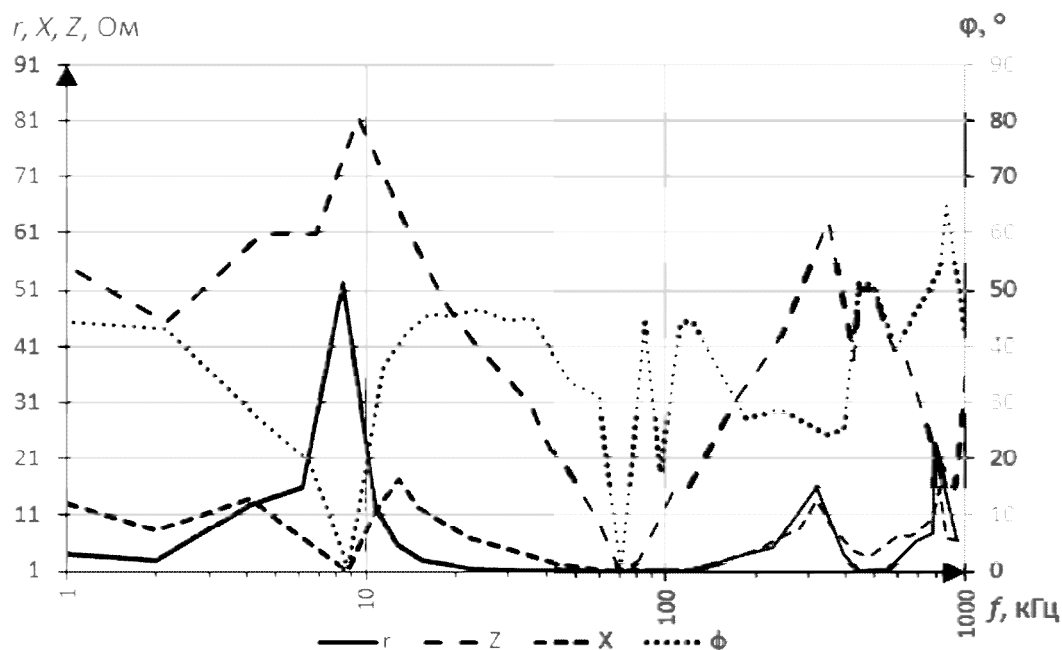


Рисунок 3.9 – Залежність комплексних складових вхідного опору РЕМ ЗТП-8 з боку споживача від частоти для фази А

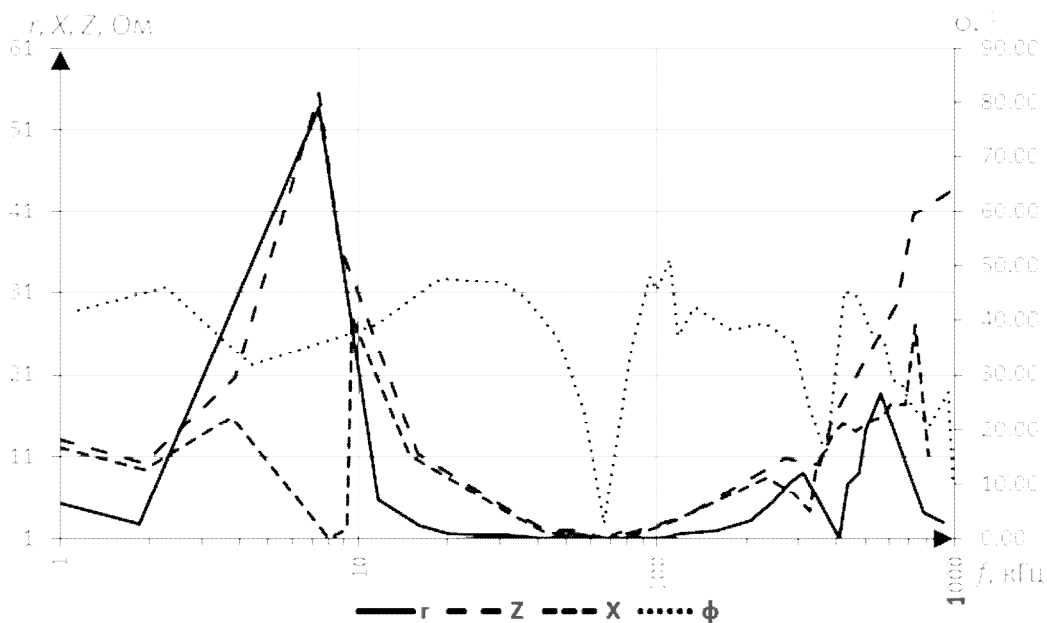


Рисунок 3.10 – Залежність комплексних складових вхідного опору РЕМ ЗТП-8 з боку споживача від частоти для фази В



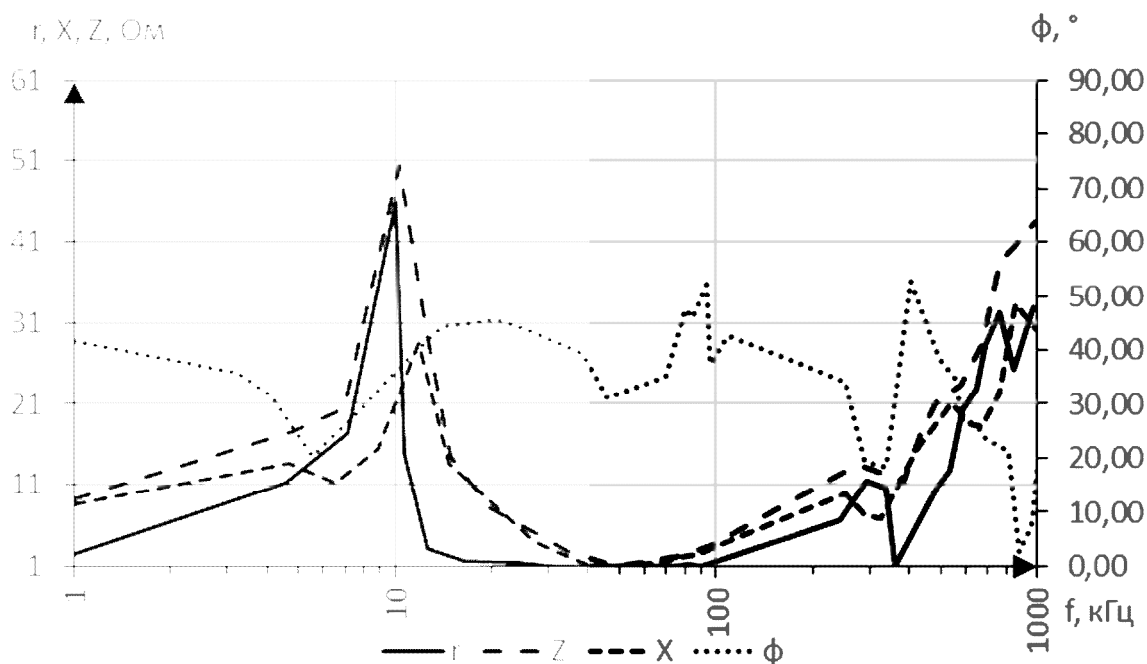


Рисунок 3.11 – Залежність комплексних складових вхідного опору РЕМ ЗТП-8 з боку споживача від частоти для фази С

Таким чином на основі аналізу результатів проведених досліджень вхідного опору ЗТП-8 встановлено, що:

1. Резонанс струмів для дослідної мережі спостерігається в районі 8 кГц, 50 кГц, 288 кГц та 780 кГц;
2. Для ділянки мережі в зворотному напрямку спостерігається резонанс струмів на частоті 9 кГц для всіх фаз та на частоті 280 кГц для фази А, а резонанс напруг для всіх фаз на частоті 50 кГц.
3. На більш високих частотах від частоти 400 кГц спостерігається лінійне зростання вхідного опору по всіх фазах.
4. Вхідний опір має різний характер в різних діапазонах частот.

### 3.2.2 Дослідження рівнів передачі сигналів по розподільним електричним мережам 0,4...10кВ

Результати досліджень наведені на рис. 3.12 – рис. 3.13. На рис. 3.12 наведено залежність загасання сигналу за напругою по всіх фазах А, В, С та нульовому проводі 0 в точці 2 при підключенні генератора в точці 1 між фазою А та нульовим проводом (додаток А рис. А.1). Відстань між мочками 1 та 2

складає 280м. Точка 1 розташована безпосередньо на шинах ЗТП-8. Загальне навантаження на силовий трансформатор ЗТП-8 на стороні 380В складала 250-280А. Навантаження фідера точки 2 складала 22-30А.

Криві 1, 2, 3, 4 відповідають загасанням напруги в фазах А, В, С і 0 в контрольній точці 2. Крива 5 показує рівень завад в фазних проводах, а 6 – рівень завад в 0-у проводі по відношенню до заземлення.

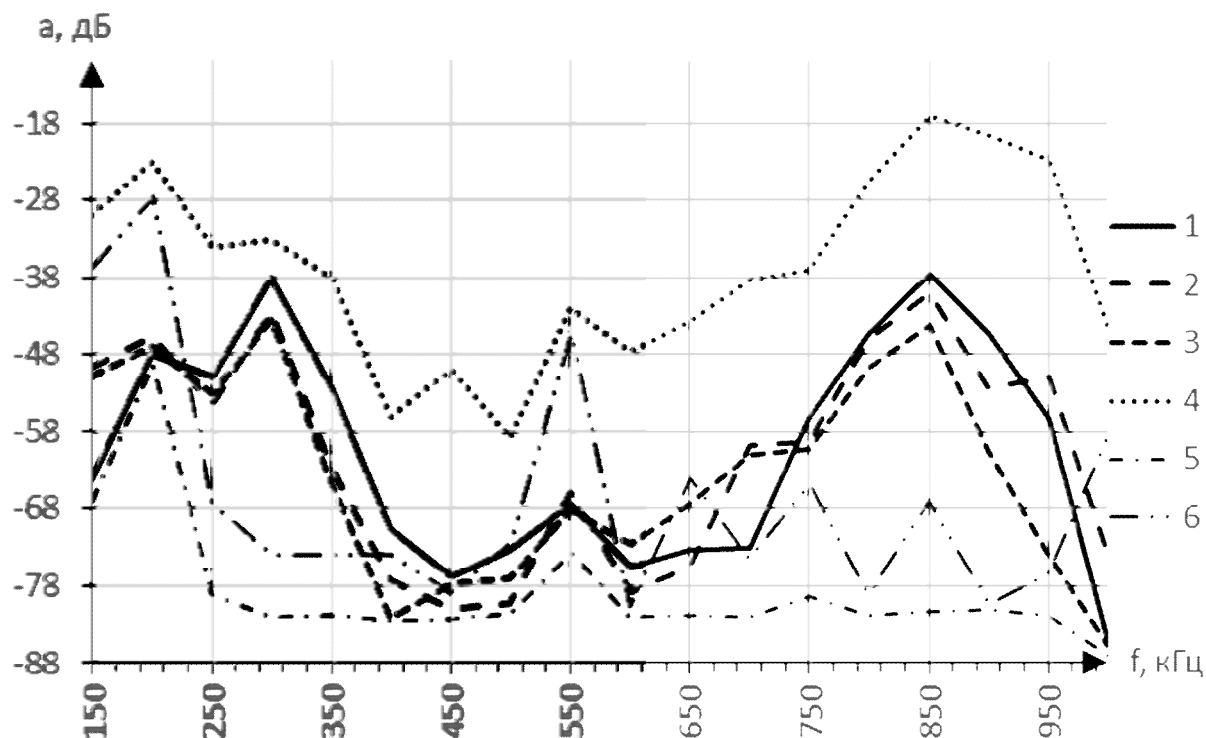


Рисунок 3.12 – Відносні рівні напруги при передачі сигналів з т.1 в т.2 РЕМ ЗТП-8: 1 -  $P_U(A_2)$ ; 2 -  $P_U(B_2)$ ; 3 -  $P_U(C_2)$ ; 4 -  $P_U(3_2)$ ; 5 -  $P_U(A_2)^{\Phi}$ ; 6 -  $P_U(3_2)^{\Phi}$

Аналіз залежності рис. 3.12 показав, що зміна напруги у всіх фазах та нульовому проводі має майже однаковий характер. Зокрема на частотах 200, 550 та 850 кГц всі криві, включаючи криві завад, мають максимуми, тобто спостерігається як збільшення завад так і рівня сигналу.

На частотах 400-500 кГц та 600-650 кГц спостерігається зниження рівня сигналів на всіх фазах. Коливання загасання сигналів лежить в межах -18-85дБ.

По фазі А, до якої було підключено генератор сигналів, мінімальний рівень сигналу було зафіксовано на частоті 450 кГц і становив -76дБ, а максимальний – на частоті 300кГц і становив -38дБ.

Результати досліджень передачі сигналів у зворотному напрямку від т.2 додаток А рис. А.1 до т.1 додаток А рис. А.1 наведено на рис. 3.13. При цьому генератор підключався в т.2 додаток А рис. А.1 між фазою А та землею по схемі фаза-земля.

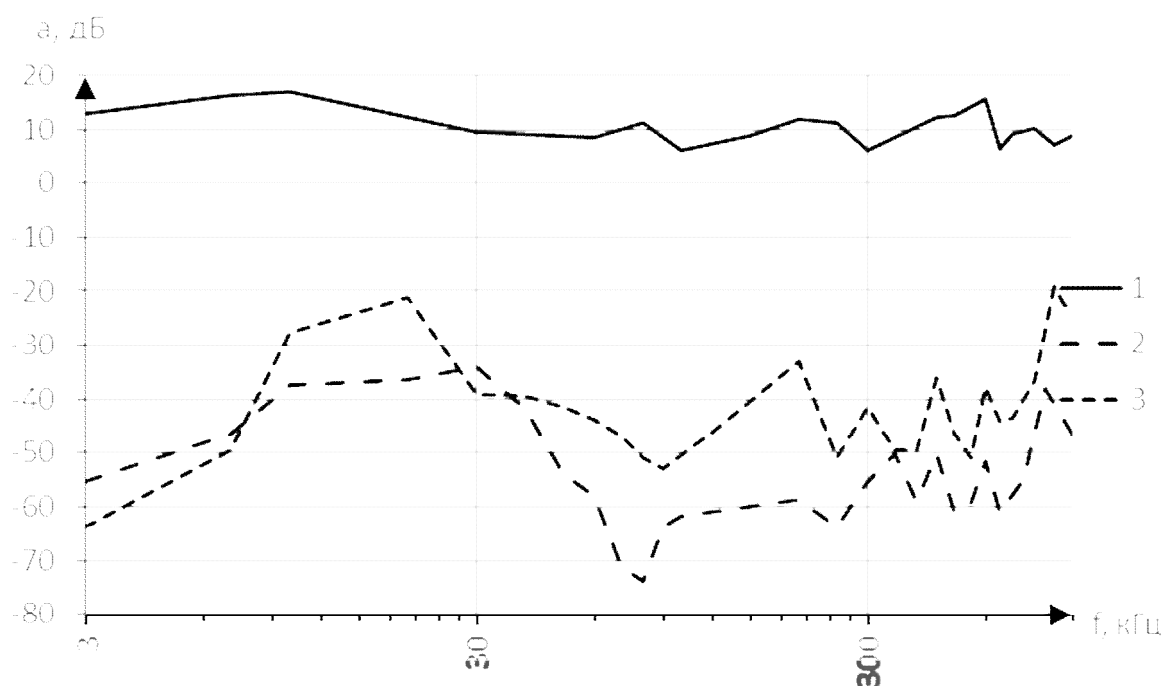


Рисунок 3.13 – Відносні рівні напруги при передачі сигналів з т.2 в т.1:

$$1 - P_U(A_2); 2 - P_U(C_1); 3 - P_U(3_1);$$

Аналіз отриманих залежностей показав що характер зміни рівня передачі сигналу несуттєво відрізняється від аналогічної залежності при передачі із т.1 додаток А рис. А.1 в т.2 додаток А рис. А.1, однак на частотах 28-35кГц він найнижчий в межах -71 ÷ -73 дБ, а на частотах 10-30 кГц суттєво вищий – -37 ÷ -21 дБ.

Залежності відносних рівнів передачі по напрузі між т.5 та т.4 додаток А рис. А.3 наведено на рис. 3.14. Навантаженням даних фідерів є побутові споживачі, середнє навантаження яких становить 0,5-1,5 А. На даному трасі

передачі спостерігається суттєвий розкид загасання між окремими фазами, який сягає  $-25 \div -65$  дБ, що пояснюється малим і несиметричним навантаженням фідерів, деякі з яких взагалі були без навантаження.

Залежності абсолютних рівнів передачі сигналів за струмом по схемі «А-0» наведені на рис. 3.16. Аналіз залежності показав, що рівні передачі за струмом мають приблизно однакові значення в широких частотних діапазонах для кожної з фаз та нульового проводу.

Суттєва розбіжність за рівнем передачі в фазах і нульовому проводі спостерігається в частотному діапазоні 200-800 кГц. Максимальне відхилення знаходиться на частоті 400 кГц і становить -32 дБ та на частоті 650 кГц і становить -25 дБ. Слід відзначити суттєво нижчий рівень передачі за струмом в нульовому проводі на тій самій частоті 300 кГц.

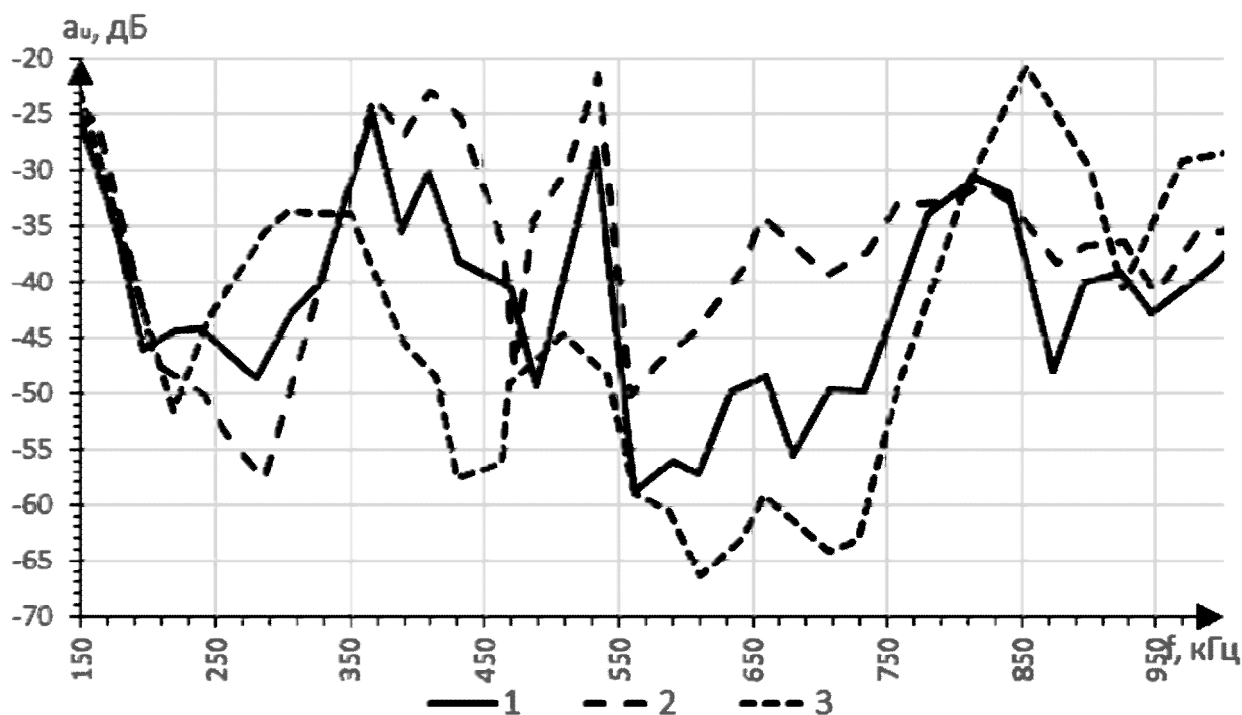


Рисунок 3.14 – Відносні рівні напруги при передачі сигналів з т.5 в т.4

$$1 - a_u(A_4); 2 - a_u(B_4); 3 - a_u(C_4)$$

Залежність рівнів передачі сигналів по струму від частоти при підключенні джерела напруги до т.1 додаток А рис. А.1 по схемі «фаза А-0» і прийомом в т.2 додаток А рис. А.1 наведені на рис. 3.15. Аналіз отриманої залежності показав,

що рівень передачі за струмом має приблизно однакове значення в широкому діапазоні частот (350-1000 кГц) по кожній з фаз і нульовому проводу. Залежність представлена в у вигляді абсолютних рівнів для відображення непостійності рівня на стороні передачі.

Значна різниця рівнів передачі за струмом спостерігається в фазах і нульовому проводі в частотному діапазоні 200-400 кГц. Максимальна розбіжність між фазами і нульовим проводом спостерігається на частоті 300 кГц і сягає 18 дБ. Слід відзначити, що рівень передачі в нульовому проводі на цій частоті значно нижчий ніж в фазних проводах.

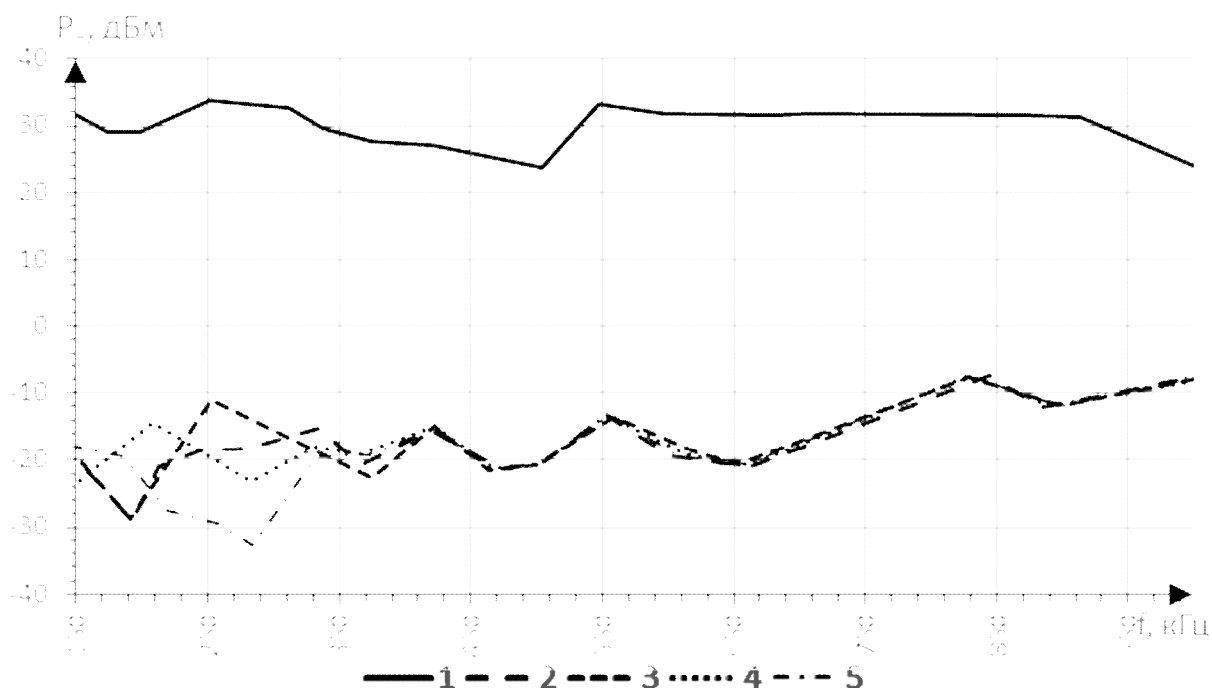


Рисунок 3.15 – Абсолютні рівні струму при передачі сигналів з т.1 в т.2:

1 -  $P_I(A_1)$ ; 2 -  $P_I(A_2)$ ; 3 -  $P_I(B_2)$ ; 4 -  $P_I(C_2)$ ; 5 -  $P_I(3_2)$

### 3.2.3 Дослідження рівнів передачі сигналів по розподільній електричній мережі з рівня 0,4 кВ на рівень 10 кВ

Результати дослідження передачі сигналів із т.14 в т.10 додаток А рис. А.4 представлені на рис. 3.16 та рис. 3.17. Відстань між т.14 та т.10 додаток А рис. А.4 по тракту 10 кВ складає 100м. На рис. 3.16 крива 1 – відносний рівень передачі по напрузі сигналу в фазі А на шинах 0,4 кВ т.14. криві 2, 3, 4

відповідають відносним рівням напруги в фазах В, С та нульовому проводі в т.10 додаток А рис. А.4.

Аналіз отриманих даних показав, що на стороні прийому максимальний розкид значень рівнів сигналів по напрузі лежить в межах -35 дБ на частоті 775 кГц.

Переважного проходження сигналу ні в одній із фаз не зафіксовано.

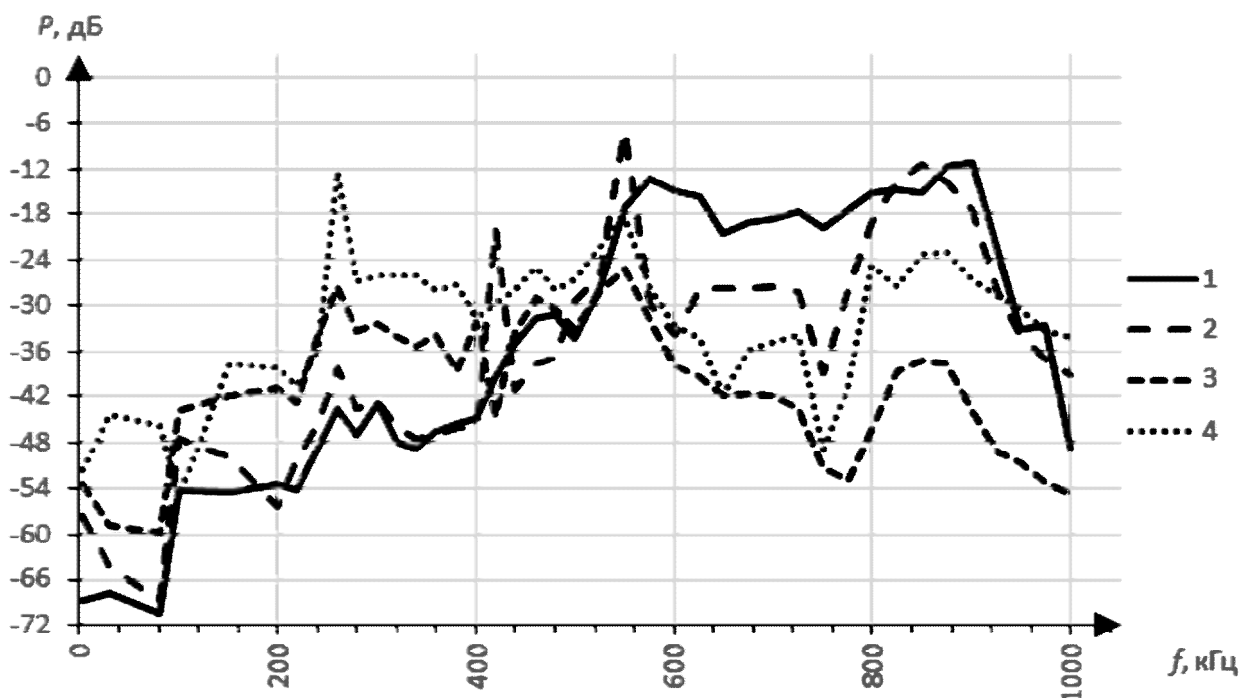


Рисунок 3.16 – Відносні рівні напруги при передачі сигналів по розподільній електричній мережі з рівня 0,4 кВ на рівень 10 кВ:

$$1 - a_U(A_{14} - A_{10}); 2 - a_U(A_{14} - B_{10}); 3 - a_U(A_{14} - C_{10}); 4 - a_U(A_{14} - Z_{10})$$

Відносний рівень передачі за струмом представлений на рис. 3.17. Максимальний рівень передачі за струмом відповідає 400 кГц і складає – -4,66 дБ. Мінімальний рівень передачі відповідає 1000 кГц – -54,72 дБ.



Рисунок 3.17 – Відносний рівень струму при передачі сигналу по розподільній електричній мережі з рівня 0,4 кВ на рівень 10 кВ

Відносно високий рівень передачі сигналів в широкому частотному діапазоні можна пояснити невеликою протяжністю лінії 10 кВ. При збільшенні довжини тракту по лінії 10 кВ характер передачі дещо змінюється, що можна спостерігати на результатах дослідження передачі сигналу з т.10 додаток А рис. А.4 в т.1 додаток А рис. А.1, що представлено на рис. 3.18. Відстань тракту по лінії 10 кВ склало 300 м, при цьому спостерігається значне зниження рівня передачі. Мінімальний відносний рівень спостерігався на частотах 150 кГц склав -73 дБ, максимальний відносний рівень спостерігався на частоті 800 кГц і склав -63 дБ. Характер зміни рівня передачі від частоти плавний, найбільш придатний для передачі є діапазон 200 – 900 кГц в якому рівень передачі майже незмінний в межах -67 дБ за винятком викиду на частоті 800 кГц, де згасання знижується до -63 кГц.

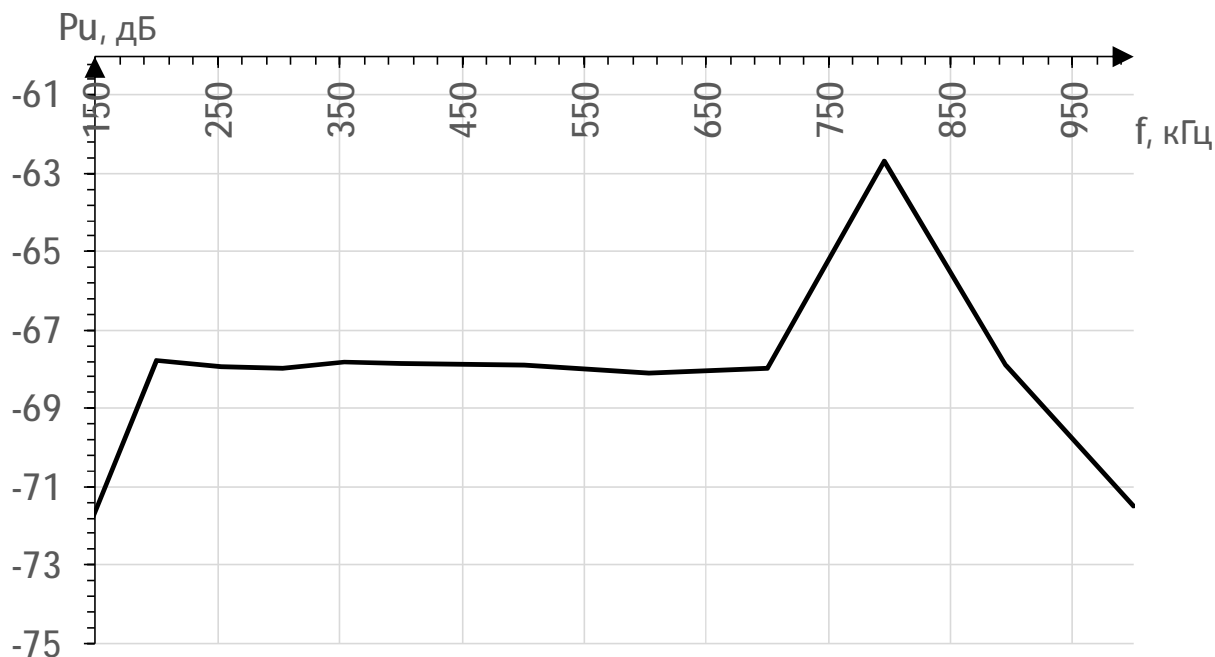


Рисунок 3.18 – Абсолютний рівень напруги при передачі сигналу по розподільній електричній мережі з рівня 0,4 кВ на рівень 10 кВ

### 3.2.4 Аналіз результатів дослідження фазочастотної характеристики розподільної електричної мережі 0,4 кВ

Дослідження ФЧХ РЕМ 0,4 кВ проводилося на дослідній мережі, схема якої представлена в додатку А на рис. А.9. Дослідження проводились для 3-х трактів, що були організовані в рамках дослідної мережі.

Враховуючи малу відстань між точками прийому тракту №1, його було використано в якості дослідного для 2-х методів вимірювання: традиційного і розробленого з метою перевірки розробленого методу.

Результати дослідження представлені на рис. 3.19.

Для отримання реальної ФЧХ трактів до відносної ФЧХ, що отримана із застосуванням розробленої методики, було додано фазовий зсув початкової частоти 10 кГц, який був отриманий традиційним методом із використанням зворотного каналу передачі сигналу. Аналіз отриманих результатів показав співпадіння між залежностями. Розбіжність не перевищує 5°.



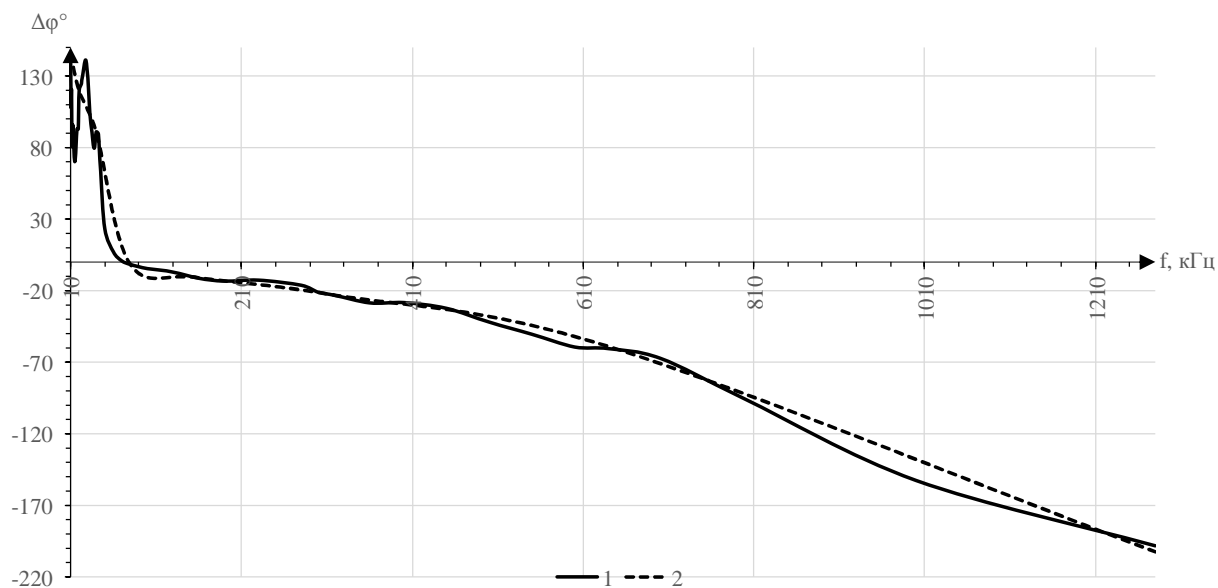


Рисунок 3.19 – ФЧХ тракту №1 з фільтрами, що отримана:

1 - традиційним методом; 2 - за розробленою методикою

Результати дослідження відносної ФЧХ трактів №1, №2 і №3 представлені відповідно на рис. 3.20.

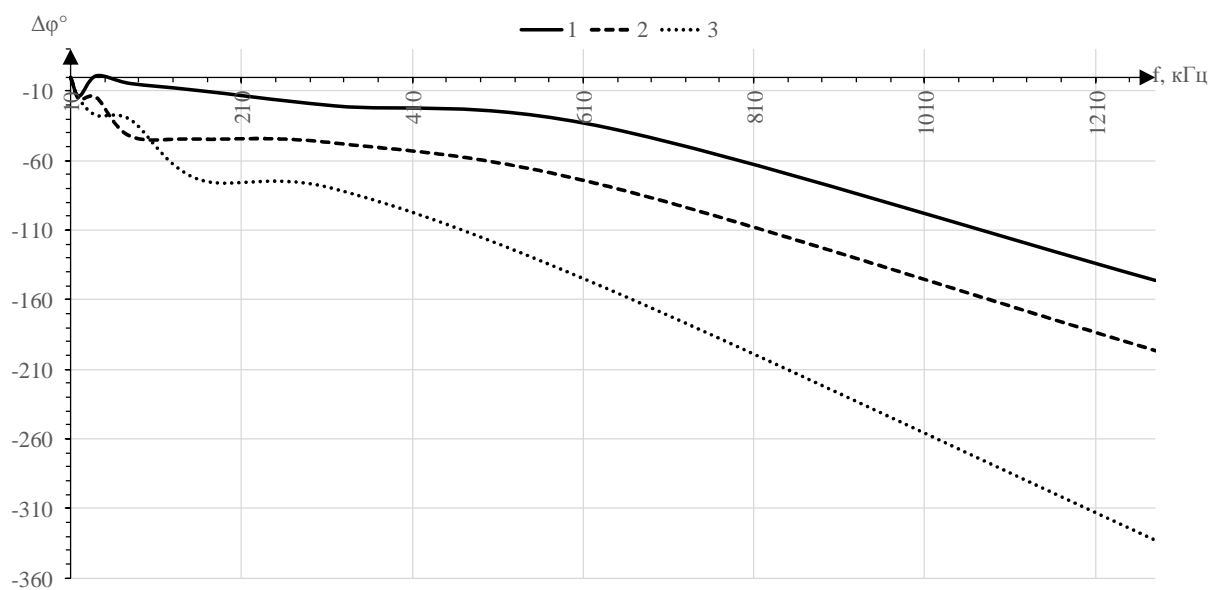


Рисунок 3.20 – ФЧХ відносно 10 кГц:

1 - тракту №1; 2 - тракту №2; 3 - тракту №3

Аналіз отриманих залежностей показав схожість в формах залежностей для всіх трактів, але відмінність у величинах фазових зсувів обумовлено різною довжиною трактів передачі сигналів. Також слід зауважити, що різко виражений

провал в ФЧХ тракту №1 на частоті 20 кГц є наслідком можливого резонансу на даній частоті. Зміна відносного фазового тракту №1 сягає  $150^\circ$ , тракту №2 -  $200^\circ$  і тракту №3 -  $320^\circ$ . Всі отримані ФЧХ мають тенденцію до спадання фазового зсуву по відношенню до 10 кГц, причому після 600 кГц крутизна спадання зростає.

### **Висновки по розділу 3**

1. Розроблено метод експериментального дослідження ФЧХ РЕМ на основі передачі по електричній мережі зфазованих сигналів, що дозволило провести дослідження ФЧХ РЕМ під напругою без створення зворотного каналу передачі сигналів.
2. Проведене експериментальне дослідження АЧХ РЕМ 0,4...10 кВ яке показало, що вони є нелінійними і не мають вираженої аналітичної залежності. Загасання лежить в межах -79 дБ – -12 дБ для різних приєднань до мережі. АЧХ РЕМ має декілька провалів і піків, що обумовлено резонансними явищами в дослідній РЕМ 0,4...10 кВ.
3. Проведене експериментальне дослідження залежності вхідного опору РЕМ 0,4...10 кВ від частоти. Встановлено, що вхідний опір ділянок РЕМ в частотному діапазоні до 1000 кГц змінюються від 1 Ом до 40 Ом, причому зміна навантаження у вузлах РЕМ практично не впливає на його значення.
4. Експериментальне дослідження відносної ФЧХ РЕМ у відповідності до розробленого методу показало, що характеристика є нелінійною та кут змінюється від  $0^\circ$  до  $320^\circ$  (по відношенню до частоти 10 кГц) для дослідних ділянок РЕМ.

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4...10 кВ ЯК СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОПОЛОСНИХ СИГНАЛІВ ТА ВИПРОБУВАННЯ ЗАСОБІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ПО НИМ**

### **4.1. Аналіз методів моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища передачі широкополосних сигналів**

Моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів є складною багатофакторною задачею, що ґрунтується на телеграфних рівняннях для багатопровідної лінії [38, 79]. Разом із тим слід зазначити, що у зв'язку із складністю отримання параметрів системи телеграфних рівнянь для інженерної практики розроблені наближені методи моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів.

#### **4.1.1 Метод моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища на основі телеграфних рівняннях**

Метод моделювання РЕМ як середовища передачі широкополосних сигналів на основі телеграфних рівняннях для багатопровідної лінії є точним методом моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів. Для його використання РЕМ представляється у вигляді багатопровідної лінії для якої записується система телеграфних рівнянь, що складається з  $n$  проводів, яка в загальному вигляді може бути представлена як [38, 79]:



де  $\mathbf{P} = \mathbf{Z}\mathbf{Y}$ ;  $\mathbf{P}^T = \mathbf{Y}\mathbf{Z}$ , що справедливо за умов симетричності матриць  $\mathbf{Z}$  та  $\mathbf{Y}$ , які описують однорідні лінії [38].

Існує два методи розв'язку системи рівнянь (4.3): метод хвильових каналів і фазний метод [38].

Для вирішення системи рівнянь (4.3) роблять декілька перетворень. Зокрема виконують перетворення матриць  $\mathbf{U}$  та  $\mathbf{I}$ :

$$\mathbf{U}_s = \boldsymbol{\lambda}^{-1}\mathbf{U}, \mathbf{I}_s = \boldsymbol{\delta}^{-1}\mathbf{I} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\lambda}\mathbf{U}_s, \mathbf{I} = \boldsymbol{\delta}\mathbf{I}_s \quad (4.5)$$

де  $\boldsymbol{\lambda}$  та  $\boldsymbol{\delta}$  – квадратні не вироджені матриці, елементи яких не залежать від повздожньої координати  $x$  [38].

З урахуванням (4.4) та (4.5) система (4.3) прийме вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{U}}_s - \frac{d^2}{dx^2}\mathbf{U}_s = \boldsymbol{\lambda}^{-1}\mathbf{P}\boldsymbol{\lambda}\mathbf{U}_s \\ \ddot{\mathbf{I}}_s - \frac{d^2}{dx^2}\mathbf{I}_{(s)} = \boldsymbol{\delta}^{-1}\mathbf{P}^T\boldsymbol{\delta}\mathbf{I}_s \end{cases} \quad (4.6)$$

Матриці  $\boldsymbol{\lambda}$  та  $\boldsymbol{\delta}$  задаються такими, що перетворюють матриці  $\mathbf{P}$  та  $\mathbf{P}^T$  у діагональні матриці. А при їх діагоналізації отримуються матриці власних значень вихідних матриць, а матриці, що перетворюються, будуть являти собою матриці власних векторів [38]. Тоді:

$$\boldsymbol{\lambda}^{-1}\mathbf{P}\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\gamma}^2; \boldsymbol{\delta}^{-1}\mathbf{P}^T\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\gamma}^2 \quad (4.7)$$

де  $\boldsymbol{\gamma}^2$  – діагональна матриця власних значень.

Для матриць власних векторів двох взаємно транспонованих матриць справедливе рівняння:

$$\boldsymbol{\lambda}^T\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{W} \quad (4.8)$$

де  $\mathbf{W}$  - деяка діагональна матриця.

Тоді достатньо визначити тільки одну з матриць  $\boldsymbol{\lambda}$  або  $\boldsymbol{\delta}$ , а друга може бути визначена із рівняння:

$$\delta = (\lambda^T)^T \mathbf{w}; \quad \lambda = (\delta^{-1})^T \mathbf{w} \quad (4.9)$$

де елементи матриці  $\mathbf{W}$  заповнюються довільними ненульовими значеннями.

Відповідно для визначення матриць  $\gamma^2$ ,  $\lambda$  та  $\delta$  достатньо вирішити тільки одне з рівнянь (4.6) [38].

Для розв'язку системи (4.6) підставимо (4.7) в (4.6), отримаємо рівняння для напруги :

$$-\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{U}_s = \gamma_s^2 \mathbf{U}_s \quad (4.10)$$

Розв'язок рівняння (4.10) має вигляд:

$$\mathbf{U}_s = e^{-\gamma_s x} \mathbf{B}_{1s} + e^{\gamma_s x} \mathbf{B}_{2s} = \mathbf{U}_{s.\text{пад}} + \mathbf{U}_{s.\text{відб}} \quad (4.11)$$

де  $e^{-\gamma_s x}$  – експоненціальна функція від діагональної матриці  $\gamma_s x$ , яка представляє собою діагональну матрицю з членами  $e^{-\gamma_s x}$ ;  $\mathbf{B}_{1s}$  і  $\mathbf{B}_{2s}$  – стовбцеві матриці з відповідними постійними інтегрування;  $\mathbf{U}_{s.\text{пад}}$  і  $\mathbf{U}_{s.\text{відб}}$  – відповідно матриці падаючої та відбитої хвиль напруги [38].

Члени отриманої матриці  $\gamma$ ,  $\mathbf{U}_s$  та  $\mathbf{I}_s$  являють собою коефіцієнти розповсюдження, напруги та струми хвильових каналів, а матриці  $\lambda$  та  $\delta$  по суті є матрицями співвідношень відповідно напруг і струмів хвильових каналів, причому кожний  $s$ -й хвильовий канал характеризується  $s$ -м рядком цих матриць, а кожний  $k$ -й провід –  $k$ -ю строкою.

Відповідно можна показати, що:

$$\mathbf{U}_{s.\text{пад}} + \mathbf{U}_{s.\text{відб}} = \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_s = \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_{s.\text{пад}} + \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_{s.\text{відб}} \quad (4.12)$$

де  $\mathbf{Z}_s$  – матриця модальних хвильових опорів, що є діагональною матрицею [38]:

$$\mathbf{Z}_s = \gamma^{-1} \lambda^{-1} \mathbf{Z} \delta \quad (4.13)$$

З (4.11) випливає, що в будь-якому провіднику пучка провідників результуючий струм і напруга в загальному випадку складаються з  $k$  складових

хвиль, що одержали назву падаючих парціальних хвиль  $(e^{-g_k x})$  і відбитих парціальних хвиль  $(e^{+g_k x})$ . З отриманих розв'язків видно, що в пучку існує  $k$  незалежних каналів, по яких поширюються хвилі струму й напруги з постійними поширення  $g_k$ . Таким чином, при багатопровідній конструкції лінії процес передачі електромагнітної енергії носить багатохвильовий характер.

Амплітуда струму або напруги якої-небудь хвилі залежить від величини постійної поширення відповідного шляху поширення. У результаті визначення виразів для постійних поширення парціальних хвиль і їх аналізу одержуємо розв'язок основного завдання, тобто величини напруги й струму в будь-якій точці кожного проведення лінії. Однак розв'язок системи рівнянь (4.1) у загальному випадку є складним у зв'язку з залежністю параметрів матриць  $\mathbf{P}$  та  $\mathbf{P}^T$  від дуже багатьох факторів як класичних розподілених опорів, індуктивності, ємності, так і геометричного розташування проводів по відношенню один до одного і до інших струмопровідних конструкцій, що утворюють паразитні канали, наявності точок неоднорідності.

Для спрощення розрахунків реальні трифазні повітряні лінії приводять до еквівалентної симетричної лінії. Спрощення розрахунків при симетрії проводів пояснюється виникненням у такій лінії при розповсюдженні електромагнітної енергії ряду хвиль із однаковою постійною поширення. Розв'язок диференціальних рівнянь для еквівалентної симетричної лінії дозволяє обмежитися визначенням залежностей тільки для двох хвиль, земляний (три проводи – земля) і міжфазної (провід - два проводи) [38].

З іншого боку на практиці, як правило, цікавлять значення струмів та напруг в конкретних точках, а саме на початку лінії та в місцях прийому сигналу. В цьому випадку РЕМ і окремі її частини представляються у вигляді багатополосників, а саме  $2n + 1$  полюсника. Загальний вигляд такого багатополосника наведено на рис. 4.1.

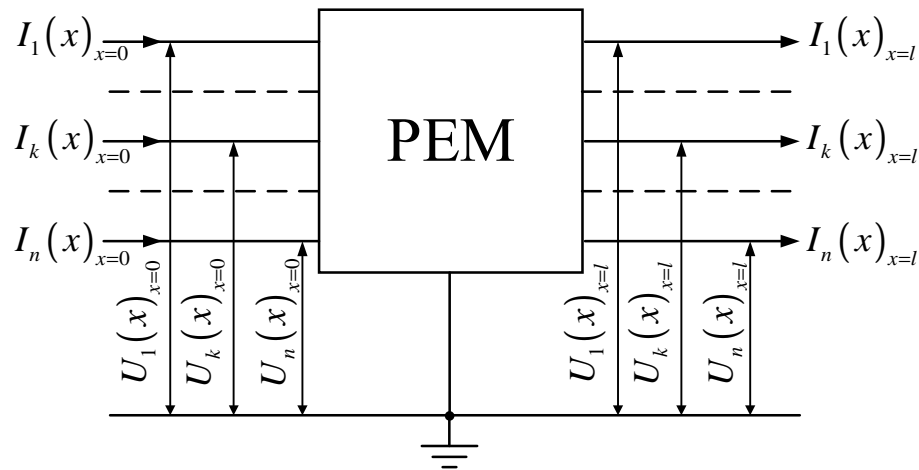


Рисунок 4.1 – Модель розподільної електричної мережі у вигляді  $2n + 1$  полюсника

В загальному випадку такі  $2n + 1$  полюсники можна описати за допомогою різних типів матричних рівнянь, з яких найбільш вживані:

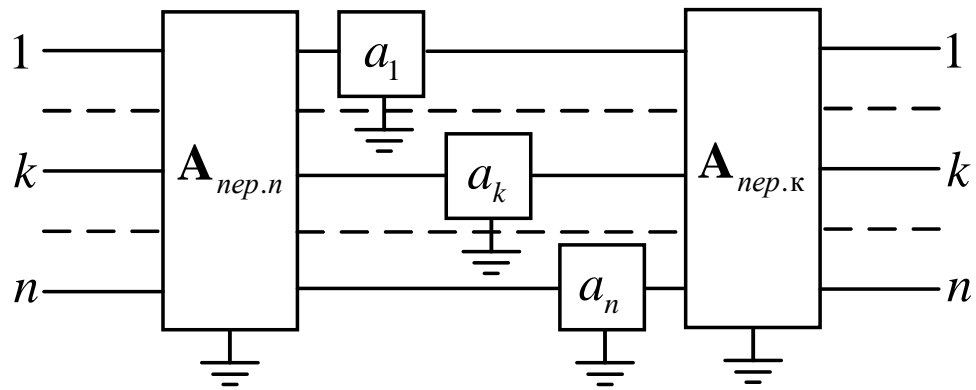
$$\begin{aligned}
 \begin{cases} \mathbf{U}_n = \mathbf{A}_{11} \mathbf{U}_\kappa + \mathbf{A}_{12} \mathbf{I}_\kappa \\ \mathbf{I}_n = \mathbf{A}_{21} \mathbf{U}_\kappa + \mathbf{A}_{22} \mathbf{I}_\kappa \end{cases} \\
 \begin{cases} \mathbf{I}_n = \mathbf{Y}_{11} \mathbf{U}_n + \mathbf{Y}_{12} \mathbf{U}_\kappa \\ \mathbf{I}_\kappa = \mathbf{Y}_{21} \mathbf{U}_n + \mathbf{Y}_{22} \mathbf{U}_\kappa \end{cases} \\
 \begin{cases} \mathbf{U}_n = \mathbf{Z}_{11} \mathbf{I}_n + \mathbf{Z}_{12} \mathbf{I}_\kappa \\ \mathbf{U}_\kappa = \mathbf{Z}_{21} \mathbf{I}_n + \mathbf{Z}_{22} \mathbf{I}_\kappa \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

де  $\mathbf{U}_n$ ,  $\mathbf{I}_n$ ,  $\mathbf{U}_\kappa$ ,  $\mathbf{I}_\kappa$  – стовбцеві матриці  $n$ -ого порядку, елементами яких є напруги полюсів відносно землі і струми на початку та кінці  $2n + 1$  полюсника, а  $\mathbf{A}_{ij}$ ,  $\mathbf{Y}_{ij}$ ,  $\mathbf{Z}_{ij}$  – відповідно квадратні матриці  $n$ -ого порядку залежностей між напругами та струмами полюсів на початку та в кінці  $2n + 1$  полюсника [38].

По суті рівняння (4.14) є відомими рівняннями багатополіусників, де в якості елементів виступають вектор та матриці  $n$ -ого порядку.

В роботі [38] показано можливість перетворення таких багатополіусників, що описують багатопровідну лінію електропередач до вигляду, яке представлено на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Схема заміщення  $2n + 1$  полюсника

де –  $\mathbf{A}_{nep.n} = \begin{bmatrix} \lambda_n & 0 \\ 0 & \delta_n \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A}_{nep.k} = \begin{bmatrix} \lambda_n^{-1} & 0 \\ 0 & \delta_n^{-1} \end{bmatrix}$  – матриці ідеальних багатополюсних перетворювачів відповідно для початку і кінця  $2n + 1$  полюсника.

Такий перехід дозволяє розглядати кожний окремий фазний провід лінії як окремий 4-х полюсник, після чого повернутися назад до повної схеми  $2n + 1$  полюсника [38].

Але отримання параметрів навіть проводів окремих фаз трифазної мережі не є простим, оскільки їх параметри залежать ще й від геометричних розмірів проводів та їх взаємного розташування і відстані по відношенню до землі.

З іншого боку в роботі [38] також отриманий загальний розв'язок рівняння (4.14) у вигляді елементів матриці  $\mathbf{A}$  як:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} = \lambda \operatorname{ch}(\gamma l) \lambda^{-1} & \mathbf{A}_{12} = \lambda \operatorname{sh}(\gamma l) \mathbf{Z}_\delta \delta^{-1} \\ \mathbf{A}_{21} = \delta \operatorname{sh}(\gamma l) \mathbf{Y}_\delta \lambda^{-1} & \mathbf{A}_{22} = \delta \operatorname{ch}(\gamma l) \delta^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Але для розв'язання рівняння (4.14) необхідне знання співвідношення між  $\mathbf{U}_\kappa$  та  $\mathbf{I}_\kappa$ , які пов'язані між собою через навантаження багатополюсника, яке характеризується матрицею опорів  $\mathbf{Z}_\kappa$  або матрицею провідностей  $\mathbf{Y}_\kappa$ , та пов'язаним між собою співвідношенням:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_\kappa = \mathbf{Z}_\kappa \mathbf{I}_\kappa \\ \mathbf{I}_\kappa = \mathbf{Y}_\kappa \mathbf{U}_\kappa \end{cases} \quad (4.16)$$

Аналогічно пов'язані між собою і напруги та струми на вході багатополюсника:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ex} = \mathbf{Z}_{ex} \mathbf{I}_{ex} \\ \mathbf{I}_{ex} = \mathbf{Y}_{ex} \mathbf{U}_{ex} \end{cases} \quad (4.17)$$

Підставивши (4.16) в (4.14) і використавши співвідношення (4.17), отримаємо:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_k = (\mathbf{A}_{11} + \mathbf{A}_{12} \mathbf{Y}_k)^{-1} \mathbf{U}_n \\ \mathbf{I}_k = (\mathbf{A}_{21} + \mathbf{A}_{22} \mathbf{Y}_k)^{-1} \mathbf{Z}_{ex} \mathbf{U}_n \end{cases} \quad (4.18)$$

Таким чином на основі аналізу (4.11) та (4.18) встановлено, що процес розповсюдження високочастотних сигналів по РЕМ характеризується постійними інтегрування  $\mathbf{B}_{1s}$  і  $\mathbf{B}_{2s}$  та сталими розповсюдження  $\gamma$ , для визначення яких необхідно знати матрицю входних опорів РЕМ  $\|\mathbf{Z}_{ex}\|$ , матрицю  $\|\mathbf{A}\|$ , матрицю провідностей навантаження  $\|\mathbf{Y}_k\|$  РЕМ.

Розрахунок методом на основі телеграфних рівнянь є складним та таким, що потребує наявності вихідних даних не тільки про топологію мережі, але й точну інформацію щодо проводів та їх геометричної просторової топології, що не завжди можна практично отримати. Також слід відзначити, що матричні телеграфні рівняння не дають чіткої функціональної залежності між параметрами ВЧ тракту по РЕМ та факторами, що на них впливають, що ускладнює процес вибору оптимальних параметрів побудови оптимальних схем організації ВЧ трактів [38]. Разом із тим при збільшенні розгалуженості та неоднорідності ділянок РЕМ зростає розмірність матриць та ускладнюється розрахунок, що робить його неприйнятним для використання в інженерній практиці.

#### **4.1.2 Наближені методи моделювання розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ як середовища передачі сигналів**

Для вирішення задачі моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів при передачі класичних вузькополосних сигналів використовують також наближені методи [38, 77, 78, 128, 129].

Наближені методи розрахунку параметрів РЕМ застосовуються із припущенням, що реальні лінії електропередач РЕМ еквівалентні двопровідній лінії [128, 129].

Метод розрахунку оснований на представленні лінії у вигляді двопровідного ланцюга протягом якого є  $n$  відгалужень. Для такого ланцюга параметри РЕМ можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} a_{\text{роб}} &= \ln \frac{Z_{\Gamma} + Z_{\text{ex},n}}{2\sqrt{Z_{\Gamma}Z_{\text{in},n}}} n\phi_1 n\phi_2 \dots n\phi_n \quad (4.19) \\ Z_{\text{ex},n} &= \frac{Z_{u1}Z_{\text{ex},1}}{Z_{u1} + Z_{\text{ex},1}} \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} n\phi_k &= 1 + \frac{Z_{\text{ex},k}}{Z_{u,k}}, \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, n \\ n_k &= \frac{Z_{n,k}}{Z_{c,k}} (\text{sh}(g_k l_k) + \text{ch}(g_k l_k)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{ex},k} &= Z_{c,k} \text{th}(g_k l_k + e_k) \frac{Z_{\text{ex},k}}{Z_{u,k}}, \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, n \\ \text{th}(e_k) &= \frac{Z_{n,k}}{Z_{c,k}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{n,k} &= \frac{Z_{u(k+1)}Z_{\text{ex},(k+1)}}{Z_{u(k+1)} + Z_{\text{ex},(k+1)}}, \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, n-1 \\ Z_{n,k} &= Z_{n,1}, \quad \text{при } k = n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{u,k} &= Z_{u,1}, \quad \text{при } k = 1 \\ Z_{u,k} &= Z_{c,\text{сид},k} \text{th}(g_{\text{сид},k} l_{\text{сид},k} + e_{\text{сид},k}), \quad \text{при } k = 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

$n\phi$  – коефіцієнт передачі за струмом через  $k$ -й шунт;

$n_k$  – коефіцієнт передачі за струмом через  $k$ -у ділянку лінії;

$Z_{\text{ex},k}$  – вхідний опір  $k$ -ї ділянки лінії;

$Z_{n,k}$  – опір навантаження  $k$ -ї ділянки лінії;

$Z_{u,1}$  – вхідний опір всіх фідерів, що включено паралельно на початку тракту;

$Z_{ш.k}$  – вхідний опір  $k$ -го відгалуження;

$g_k = a_k + jb_k$  – комплексний коефіцієнт передачі  $k$ -ої однорідної ділянки лінії із довжиною  $l_k$ .

Навіть при використанні наближеного методу обчислення параметрів РЕМ викликає певну складність у зв'язку із необхідністю знання топології мережі та параметрів ділянок, що входять не тільки до тракту, а і до всіх відгалужень, що до нього примикають та неточністю їх еквівалентування. У зв'язку із цим в роботах [38, 39, 56, 77, 78, 79] проведено ряд досліджень на основі яких розроблено наближений метод у відповідності до якого тракт задається двома характеристиками:

$$\begin{cases} a_{mp} = a_{mp.дл} + Da_{від} \\ Z_{ex} = K_{ex} Z_c \end{cases} \quad (4.20)$$

де  $a_{mp.дл}$  – загасання ліній, що входять до тракту за умови, що всі хвилі, що виникли внаслідок відбиття від місць порушення однорідності, повністю загасають в однорідних ділянках тракту,  $Z_c$  – характеристичний опір лінії, поправка  $Da_{від}$  та коефіцієнт  $K_{ex}$  враховують багатократні відбиття в точках порушення однорідності.

Величина  $a_{mp.дл}$ , як правило, відносно повільно змінюється з частотою, а  $Da_{від}$  має складну залежність, що суттєво залежить від топології мережі і сильно змінюється при її зміні (наприклад при оперативних перемиканнях в РЕМ) [38].

Характеристики елементів РЕМ, що входять до складу тракту визначені експериментальним шляхом і представлені у довідниках, найбільш поширеним з яких є [77], в якому представлений метод по визначенню робочого загасання  $a_{mp}$  у вигляді:

$$a_{mp} = a_{\phi} \overset{\circ}{a}_i l_i + a_k + \overset{\circ}{a}_k a_{отв.k} + \overset{\circ}{a}_j a_{каб.j} + a_{нф} \quad (4.21)$$

де  $a_{\phi}$  – кілометричне загасання тракту;  $a_k$  – кінцеве загасання;  $a_{отв.k}$  – загасання  $k$ -го відгалуження;  $a_{каб.j}$  – загасання  $j$ -ї кабельної вставки;  $a_{нф}$  – загасання полосових фільтрів.

Основою методу є розрахунок граничної частоти, на якій загасання в тракті не перевищує загасання апаратури, що перекривається. Метод враховує загасання в типових елементах, що входять до складу ВЧ тракту та відгалуження. Розрахунок здійснюється на основі експериментальних даних, що були отримані в процесі дослідження типових елементів РЕМ для класів напруг від 35 кВ до 500 кВ в частотному діапазоні 20-500 кГц. Характеристики представлені для схем приєднання фаза-земля, фаза-фаза, грозозахисний трос-земля, провід-провід розщепленої фази і т.д.

Але слід зауважити, що дані методи непридатні для визначення параметрів РЕМ при передачі ШПС, оскільки відсутні параметри елементів РЕМ 10...35 кВ в широкому частотному діапазоні, а для РЕМ 0,4 кВ як правило взагалі відсутні дані щодо частотних параметрів елементів РЕМ.

#### **4.2. Розрахунок параметрів розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ на основі чисельного вирішення просторової задачі розподілу електромагнітних полів в елементах РЕМ**

Для вирішення задачі визначення параметрів РЕМ як середовища передачі ШПС в роботі РЕМ розглядається як лінія із розподіленими параметрами, математичний опис якої представлено в розділі 4.1. Але при застосуванні такого підходу виникає необхідність у визначенні параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами.

Одним з підходів до вирішення задачі визначення параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами є експериментальне визначення параметрів телеграфних рівнянь, що описують процес розповсюдження ШПС по РЕМ, яке розглядалось в розділі 3.

Іншим підходом до вирішення задачі визначення параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами запропоновано в [130] і базується на представлені

лінії із розподіленими параметрами у вигляді ланцюжкових схем, де РЕМ розбивається на ділянки певної довжини. Довжина окремих ділянок розраховується із умов:

$$\begin{cases} Z_{co} = Z_{mo} \\ g_{co} = g_{mo} \end{cases} \quad (4.22)$$

де  $Z_{co}, Z_{mo}$  – характеристичний опір ділянки РЕМ;

$g_{co}, g_{mo}$  – стала розповсюдження ділянки РЕМ.

В [130] показано, що для моделювання РЕМ в широкому частотному діапазоні ділянки РЕМ представляються у вигляді мостової схеми заміщення (рис. 4.3.)

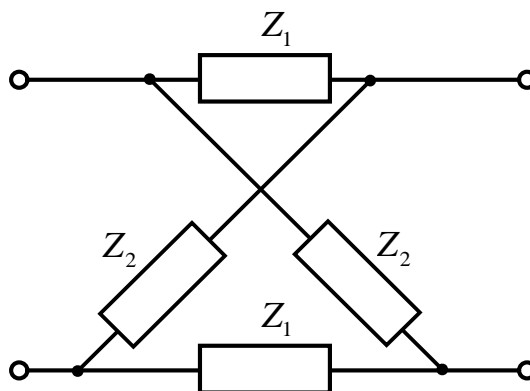


Рисунок 4.3 – Мостова схема заміщення ділянок РЕМ

де  $Z_1, Z_2$  – повздовжній та поперечний опори ділянки РЕМ.

Розбиття РЕМ на ділянки пропонується здійснювати на основі сталої розповсюдження  $|g|$  за залежністю:

$$l_{\max} = \frac{1}{|g|} \quad (4.23)$$

Проблемою у застосуванні даного підходу є визначення первинних параметрів схеми заміщення ділянки РЕМ в широкому частотному діапазоні. Як показав аналіз, що представлений в розділі 4.1 визначення цих параметрів є складною багатофакторною задачею. Ця задача ще більше ускладнюється для розрахунку параметрів силових кабелів 0,4...10 кВ, оскільки виникає

необхідність врахування електричних і магнітних властивостей ізоляційних матеріалів, що використовуються в кабелях.

Слід зауважити, що в загальному випадку вирішення цієї задачі лежить у вирішенні рівнянь Максвела для складної моделі на основі геометричного розташування складових елементів РЕМ та електричних та магнітних параметрів їх матеріалів, результатом чого є отримання первинних параметрів елементів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами.

В роботі вирішення цієї задачі використано підхід, що базується на чисельному розв'язку рівнянь Максвела та визначення первинних параметрів елементів РЕМ методом скінчених елементів [131, 132].

В якості математичного комплексу, що дозволяє вирішити поставлену задачу застосовано програмний комплекс COMSOL Multiphysics 5.3a.

Для оцінки правильності застосування запропонованого підходу проведено розрахунки параметрів для елементів РЕМ, для яких існують параметри, отримані експериментально. Так в якості дослідного об'єкта обрано силовий кабель ГРШЕ 3х35+1х10+3х4, для якого в [130] експериментальним шляхом отримано параметри як для лінії із розподіленими параметрами.

В програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a побудовано модель кабеля, зовнішній вигляд геометричного розташування складових якого представлено на рис. 4.4.

Дані матеріалів кабеля ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 представлено в [130].

Дослідження розподілу електричного потенціалу проводились шляхом моделювання подачі постійної напруги амплітудою 1В між фазами В та С, а щільність магнітного потоку шляхом моделювання струму амплітудою 1А по фазам В та С.

Для вирішення задачі визначення розподілу електричного потенціалу в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a вирішується система диференціальних рівнянь Максвела методом скінчених елементів.

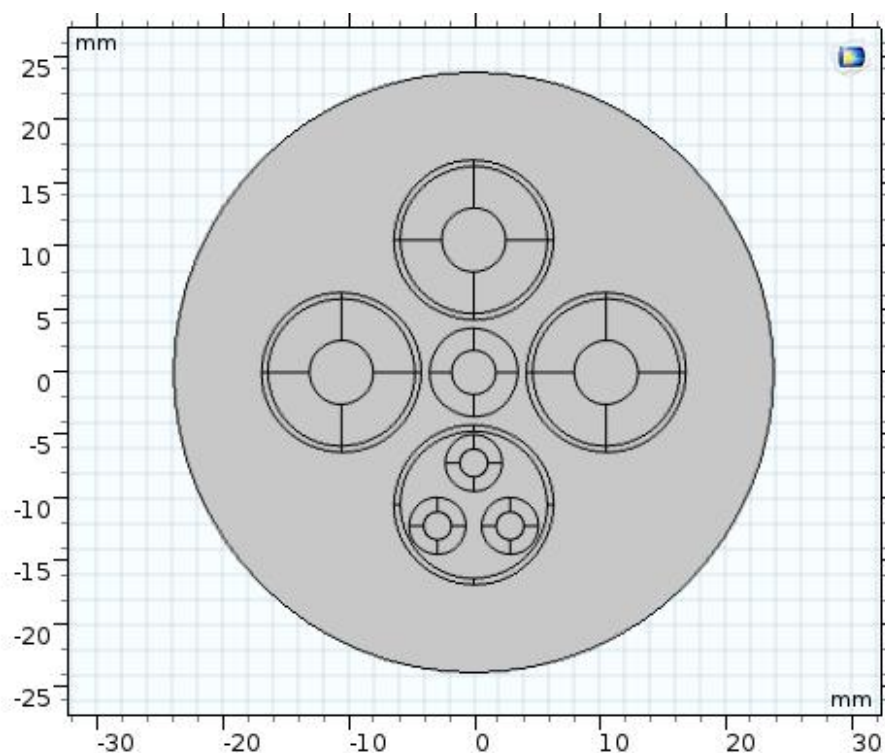


Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд геометричного розташування складових кабелю ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a

Для дослідної моделі розраховано розподіл електричного потенціалу та щільності магнітного потоку в кабелі. Результатом розв'язку є розподіл електричного потенціалу та щільність магнітного потоку в кабелі, що представлено на рис. 4.5 та рис. 4.6.

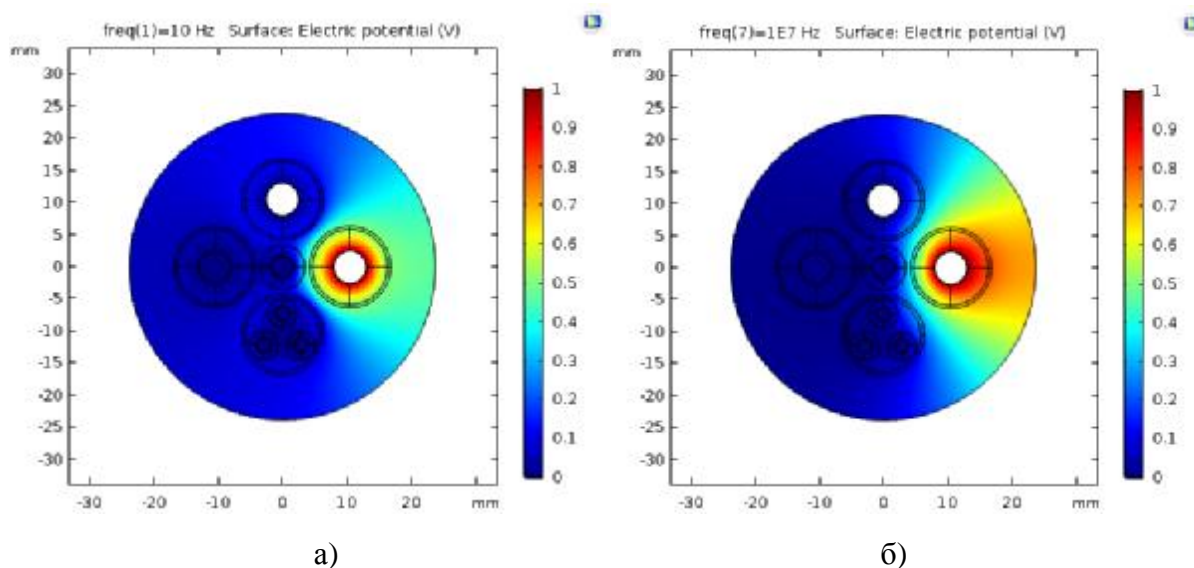


Рисунок 4.5 – Геометричний розподіл електричного потенціалу в кабелі ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)



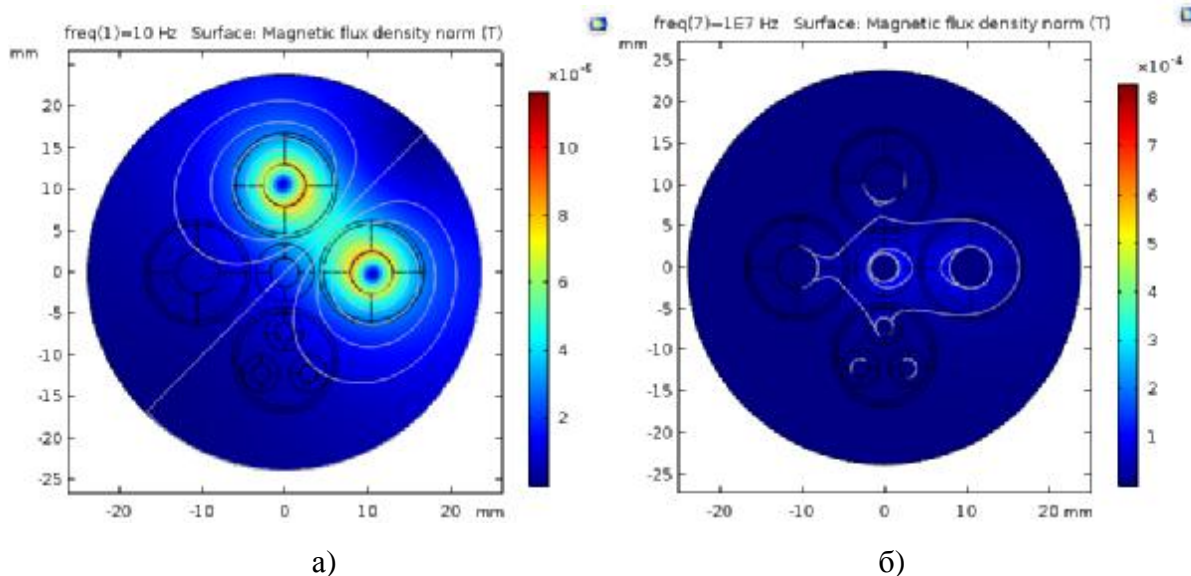


Рисунок 4.6 – Геометричний розподіл електричного потенціалу в кабелі ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)

На підставі отриманого розв'язку отримано поперечні та повздовжні кілометричні параметри кабеля ГРШЕ 3х35+1х10+3х4, а також вхідний хвильовий опір кабеля, та його стала розповсюдження, які представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Повздовжні параметри кабеля ГРШЕ 3х35+1х10+3х4.

Частота, кГц	Повздовжний опір, Ом/км	Повздовжня індуктивність, мГн/км	Поперечна провідність, мСм/км	Поперечна ємність, мкФ/км	$Z_{ex}$ , Ом/км	$\gamma$
0,01	2,565	0,700	$3,491 \cdot 10^{-7}$	0,225	$2,985 \cdot 10^{-4} + 3,04 \cdot 10^{-4}j$	429,657-422,343j
0,1	2,574	0,695	$4,067 \cdot 10^{-6}$	0,225	$8,765 \cdot 10^{-4} + 0,001j$	146,816-123,996j
1	2,709	0,665	$3,759 \cdot 10^{-4}$	0,225	$0,002 + 0,006j$	80,465-23,808j
10	5,016	0,613	0,375	0,225	$0,003 + 0,052j$	73,952-4,700j
100	14,475	0,567	3,697	0,224	$0,017 + 0,501j$	71,096-0,512j
1000	44,364	0,552	151,783	0,197	$0,313 + 4,634j$	74,511+4,08j
10000	147,220	0,547	533,134	0,174	$1,149 + 43,287j$	79,307+1,765j

Аналіз отриманих результатів проводився шляхом порівняння експериментально отриманих параметрів кабеля ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 та параметрів, отриманих в результаті моделювання.

Слід зазначити, що в процесі розв'язання задач з визначення розподілу електричного потенціалу та щільності магнітного потоку в кабелі, виникали певні труднощі внаслідок проблем із збіжністю чисельних методів по розрахунку систем рівнянь Максвела, що пов'язано із коректним врахуванням скін-ефекту на частотах вище 1 МГц.

Аналіз отриманих результатів показав, що із зростанням частоти повздовжний опір суттєво зростає із частотою, починаючи із 100 кГц від 14,475 Ом до 147,22 Ом на частоті 10 МГц. При цьому повздовжна індуктивність навпаки падає, хоч і не так суттєво від 0,665 мГн на частоті 1кГц до 0,547 мГн на частоті 10 МГц. Ці результати обумовленні дією скін-ефекту [133].

Згідно з [130] поперечні ємності жил кабеля ГРШЕ 3х35+1х10+3х4 знаходиться в межах 0,223-0,241 мкФ/км. В результаті моделювання отримана повздовжна ємність кабеля 0,225 мкФ/км на частотах до 100 кГц, що відповідає експериментальним даним, та підтверджує коректність розрахунку.

Проведені дослідження показали сталість поперечної ємності на частотах до 100 кГц та її зниження на частотах більше 100 кГц до 0,174 мкФ/км (на 23%) на частоті 10 МГц, що може бути пов'язано із перерозподілом поля в об'ємі кабеля складної конструкції. Повздовжна провідність навпаки суттєво зростає з частотою від  $3,491 \cdot 10^{-7}$  См/км на частоті 10 Гц до 533,134 См/км на частоті 10 МГц, у зв'язку із її прямою залежністю від частоти [133].

Проведені дослідження показали можливість визначення первинних параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами шляхом чисельного вирішення рівнянь Максвела для просторової моделі кабелів РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів із яких вони побудовані.

### **4.3. Розробка та впровадження пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ на основі широкополосних сигналів**

#### **4.3.1 Розробка основних вузлів пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ на основі широкополосних сигналів**

До складу інтегрованої системи керування (ІСК) входить інтегрована інформаційна мережа та сукупність пристроїв локального збору і обробки інформації та пристроїв керування. Інформаційна мережа призначена для обміну інформацією між пристроями локального збору і обробки інформації та пристроями керування з керуючим обчислювальним комплексом ІСК.

Пристрої локального збору і обробки інформації та пристрої керування мають ряд особливостей, які необхідно врахувати при розробці ІСК [81, 134, 135], а саме:

- вони є джерелами інформації різного роду та призначення (релейний захист, автоматика, пристрої обліку, засоби діагностики та ін.);
- вони оснащені різними комунікаційними інтерфейсами;
- комунікаційні інтерфейси пристроїв локального збору і обробки інформації та пристроїв керування працюють на різних швидкостях;
- інформація з пристроїв локального збору і обробки інформації та пристрої керування по комунікаційним інтерфейсам передається із використанням інформаційних протоколів зв'язку.

При розробці ІСК використано модульний підхід, який дозволив враховувати вказані особливості, що ґрунтується на розділенні задач інформаційної взаємодії на рівні у відповідності до OSI моделі (див. розділ 1.3.1).

Для забезпечення фізичного рівня OSI моделі розроблено пристрій передачі даних по РЕМ 0,4...10 кВ, блок-схема якого представлена на рис. 4.7.

Пристрій (рис. 4.7) складається із модуля керування, модуля узгодження та власне приймача-передавача.

Модуль керування призначений для організації інформаційної взаємодії із мікропроцесорними пристроями РЗА, а саме реалізує фізичний інтерфейс взаємодії із конкретним пристроєм РЗА та інформаційний протокол із пристроєм РЗА. А саме реалізовано фізичні інтерфейси RS-232 та RS-485, та протоколи ModBus та IEC 60870-5-101/103.

Модуль керування включає мікроконтролер ATmega32, який побудований за AVR RISC архітектурою, що працює на частотах до 16 МГц, містить 32 КБ пам'яті програм, 2 КБ ОЗП, підтримує 131 інструкцію та обладнаний інтерфейсом UART для побудови інформаційного зв'язку із зовнішніми пристроями РЗА.

Модуль узгодження містить пристрої, що реалізують можливість приєднання модема до середовища передачі. При передачі по РЕМ використовувався активний метод приєднання шляхом побудови фільтру приєднання, який призначений для приєднання модему до РЕМ і виконує функцію передачі сигналів від модема до РЕМ. В зворотному напрямку модуль виконує функцію захисту електричних кіл модема від напруги промислової частоти та гальванічне розв'язування кіл модема, та кіл підключення до РЕМ та виконується у вигляді фільтра високих частот. Модуль узгодження залежить від полоси частот передачі, рівня сигналів та класу напруг РЕМ. При розробці пристрою передачі для передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ використовувався модуль узгодження, що представлений в додатку А на рис. А.10.

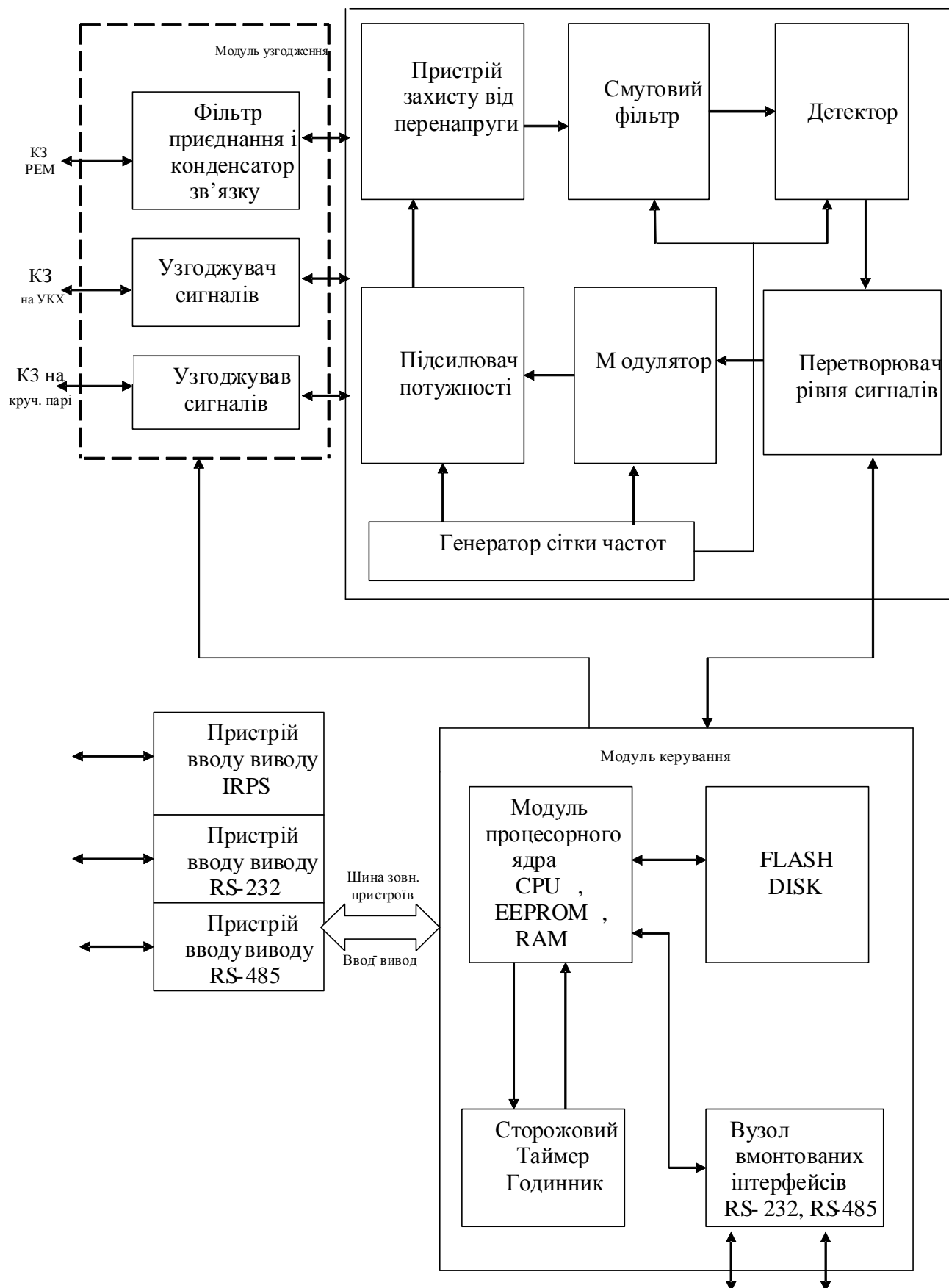


Рисунок 4.7 – Блок-схема пристрою для передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ

При розробці пристрою використано підходи, що розглядалися в розділі 2, а саме обмеження частотного спектру сигналу шляхом додаткової амплітудної модуляції функцією, що обмежена в частотному та часовому просторах. Для реалізації запропонованого підходу розроблено формувач додаткової модулюючої функції, що забезпечує локалізацію сигналів в межах спектру модулюючої функції. Структурна схема отримання модулюючої функції представлена на рис. 4.8.

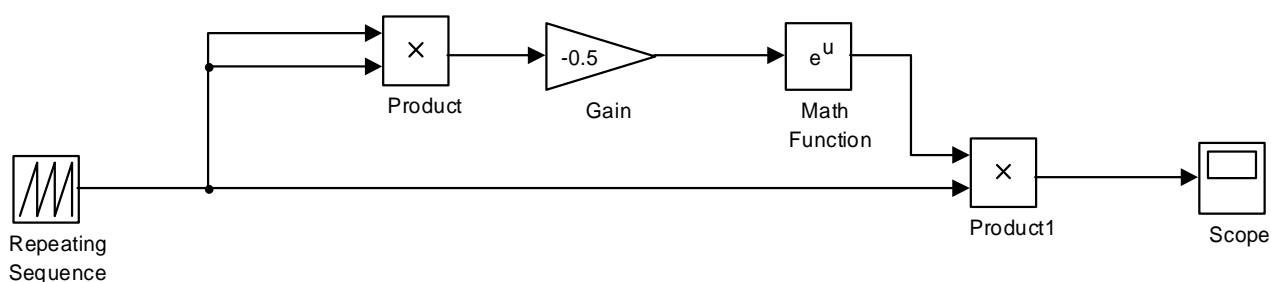


Рисунок 4.8 – Блок-схема формувача модулюючої функції для побудови сигналів з підвищеною ефективністю використання частотного спектру

Функція отримувалась в аналоговому вигляді шляхом схемних реалізацій математичних функцій. А саме функцій множення та обчислення функції  $e^u$ . Для реалізації множення сигналів використано мікросхему аналогового перемножувача AD835 [136], а для отримання  $e^u$  – багатофункціональний аналоговий обчислювальний модуль AD538 [136].

Передача інформації по РЕМ 0,4...10 кВ за допомогою розробленого пристрою здійснюється в наступний спосіб:

1. пристрій отримує інформацію по одному із фізичних інтерфейсів із можливим використанням комунікаційного протоколу, яким обладнаний пристрій-джерело інформації і розміщує її у внутрішньому буфері передачі. Буферизація інформації здійснюється з метою узгодження швидкостей роботи інтерфейсу з пристроєм та РЕМ 0,4...10 кВ;
2. інформація вибирається з буфера передачі та передається по РЕМ 0,4...10 кВ із використанням сигналів, придатних для розповсюдження по РЕМ 0,4...10 кВ;

3. пристрій на стороні прийому розпізнає сигнали, перетворює їх в двійковий формат та поміщує в буфер прийому при наявності вільного місця в ньому;
4. інформація вибирається із буферу прийому та передається пристрою-приймачу по його фізичному інтерфейсу із можливістю використання комунікаційного протоколу пристрою-отримувача.

Експериментальні дослідження, що проводились в роботі, були використані при розробці ІСК управління електроспоживанням об'єктів НГВУ "Чернігівнафтогаз" для розробки пристрою інформаційної взаємодії пристроїв РЗА групових замірних установок (ГЗУ) та диспетчерським пунктом НГВУ "Чернігівнафтогаз" по РЕМ 10 кВ.

#### **4.3.2 Впровадження пристрою передачі даних по розподільним електричним мережам 0,4...10 кВ у складі інтегрованої системи керування**

Випробування приймача-передавача виконувались в рамках РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» схема якої представлена в додатку А на рис. А.9 та НГВУ "Чернігівнафтогаз" по схемі дослідження частотних характеристик РЕМ 0,4...10кВ, що представлена в розділі 3 на рис. 3.1.

Випробування проводились для 3-х трактів РЕМ 0,4 кВ, що співпадають з дослідними вузлами при дослідженні ФЧХ РЕМ 0,4 кВ корпусу №20 національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (див. розділ 3). Передача здійснювалась повідомленнями довжиною 128 байт. Полоса передачі становила 100 кГц. Швидкість передачі становила 1200, 4800, 9600 та 19200 біт/с. Результати проведення дослідження представлені в табл.4.2 - 4.5.

Таблиця 4.2 – Результати дослідження пристрою передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ при передачі по РЕМ 0,4 кВ на швидкості 1200 біт/с

	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3
Передано повідомлень	500	500	500
Прийнято повідомлень	478	482	471
Імовірність достовірної передачі	0,956	0,964	0,942

Таблиця 4.3 – Результати дослідження пристрою передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ при передачі по РЕМ 0,4 кВ на швидкості 4800 біт/с

	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3
Передано повідомлень	500	500	500
Прийнято повідомлень	475	481	471
Імовірність достовірної передачі	0,950	0,962	0,942

Таблиця 4.4 – Результати дослідження пристрою передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ при передачі по РЕМ 0,4 кВ на швидкості 9600 біт/с

	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3
Передано повідомлень	500	500	500
Прийнято повідомлень	460	464	466
Імовірність достовірної передачі	0,920	0,928	0,932



Таблиця 4.5 – Результати дослідження пристрою передачі інформаційних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ при передачі по РЕМ 0,4 кВ на швидкості 19200 біт/с

	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3
Передано повідомлень	500	500	500
Прийнято повідомлень	408	412	411
Імовірність достовірної передачі	0,816	0,824	0,822

Випробування показали, що імовірність достовірної передачі більше 81%, а при швидкостях  $\leq 9600$  біт/с – більше 91%, що підтверджує ефективність використання запропонованих підходів в побудові інформаційних сигналів для передачі по РЕМ 0,4...10 кВ.

Роботи по створенню приймача-передавача виконувались в рамках виконання господарсько-договірної теми «Розробка та впровадження інтегрованої системи управління груповими замірними установками ГЗУ» (№ держреєстрації 0101U000631).

Розроблений пристрій також впроваджено в учбовий процес кафедри Автоматизації енергосистем шляхом розробки розділів та лабораторних робіт з курсу «Основи та засоби передачі інформації».

#### **Висновки по розділу 4**

1. В результаті аналізу методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів встановлено, що існуючі методи розрахунку використовують частотні характеристики загасання та опору елементів РЕМ, при цьому не враховують ФЧХ елементів РЕМ. Це унеможливило їх застосування до розрахунку РЕМ як середовища передачі ШПС.
2. Запропоновано підхід розрахунку параметрів елементів РЕМ шляхом чисельного розв'язання рівнянь Максвелла методом скінчених елементів

для геометричних форм складових елементів РЕМ із урахуванням електричних і магнітних параметрів матеріалів, що дозволяє застосувати метод моделювання РЕМ на основі телеграфних рівнянь для моделювання РЕМ як середовища передачі ШПС. Проведені дослідження показали коректність запропонованого підходу розрахунку параметрів елементів РЕМ, що підтверджено співпадінням експериментально визначених та чисельно розрахованих параметрів для дослідних елементів РЕМ.

3. Розроблено елементи системи інформаційного забезпечення СК РЕМ із використанням запропонованих методів та підходів, які випробувано в умовах РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволить вирішити нові задачі інформаційного забезпечення СК РЕМ в умовах впровадження технологій SmartGrid.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу, що полягає у підвищенні ефективності інформаційного забезпечення СК РЕМ шляхом передачі інформаційних ШПС з покращеними властивостями по РЕМ та у визначенні умов розповсюдження ШПС по РЕМ 0,4...10 кВ.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що тенденції розвитку ОЕС України ставлять додаткові вимоги до СК РЕМ, що обумовлює зростання об'ємів інформації СК РЕМ. Реалізація додаткових вимог до СК РЕМ потребує більш складних та оптимальних алгоритмів керування, які ґрунтуються на управлінні об'єктами генерації, розподілення та споживання РЕМ як єдиною системою. Це вимагає підвищення керованості вузлів РЕМ шляхом встановлення автоматичних і автоматизованих засобів керування та об'єднання їх в єдину інформаційну мережу. Аналіз підходів до побудови інформаційних мереж СК РЕМ показав доцільність використання РЕМ 0,4...10 кВ для передачі інформаційних ШПС.
2. На основі проведеного аналізу підходів по створенню ШПС розроблено новий метод формування ШПС із використанням додаткового перетворення сигналу за допомогою Wave-вейвлет функції, що дозволило зосередити 99% енергії сигналу в заданій полосі передачі, що підвищує ефективність використання частотного діапазону РЕМ для передачі ШПС.
3. Розроблено метод експериментального дослідження ФЧХ РЕМ на основі передачі по електричній мережі зфазованих сигналів, що дозволило провести дослідження ФЧХ РЕМ під напругою без створення зворотного каналу передачі сигналів.
4. Експериментальне дослідження АЧХ РЕМ 0,4...10 кВ показало, що вони є нелінійними і не мають вираженої аналітичної залежності. Загасання

лежить в межах -79 дБ – -12 дБ для різних ділянок мережі. АЧХ РЕМ має декілька провалів і піків, що обумовлено резонансними явищами в дослідній РЕМ 0,4...10 кВ. Встановлено, що вхідний опір РЕМ в частотному діапазоні до 1000 кГц змінюються від 1 Ом до 40 Ом, причому зміна навантаження у вузлах РЕМ практично не впливає на його значення. Дослідження відносної ФЧХ РЕМ показало, що характеристика є нелінійною та кут змінюється від  $0^\circ$  до  $320^\circ$  (по відношенню до частоти 10 кГц) для дослідних ділянок РЕМ.

5. В результаті аналізу методів розрахунку РЕМ як середовища передачі сигналів встановлено, що існуючі методи використовують частотні характеристики загасання та опору елементів РЕМ, при цьому не враховують ФЧХ елементів РЕМ. Це унеможливило їх застосування до розрахунку РЕМ як середовища передачі ШПС.
6. Запропоновано підхід розрахунку параметрів елементів РЕМ шляхом чисельного розв'язання рівнянь Максвела методом скінчених елементів для геометричних форм складових елементів РЕМ із урахуванням електричних і магнітних параметрів матеріалів, що дозволяє застосувати метод моделювання РЕМ на основі телеграфних рівнянь для моделювання РЕМ як середовища передачі ШПС. Проведені дослідження показали коректність запропонованого підходу розрахунку параметрів елементів РЕМ, що підтверджено співпадінням експериментально визначених та чисельно розрахованих параметрів для дослідних елементів РЕМ.
7. Розроблено елементи системи інформаційного забезпечення СК РЕМ із використанням запропонованих методів та підходів, які випробувано в умовах РЕМ 0,4...10 кВ, що дозволить вирішити нові задачі інформаційного забезпечення СК РЕМ в умовах впровадження технологій SmartGrid.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. Т.1. С. 66–69.
2. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния амплитудно- и фазочастотных характеристик канала передачи данных по РЭС 0,4...20 кВ на основе широкополосных сигналов. *Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*. 2006. Т.6. С. 42–45.
3. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Обработка широкополосных сигналов в информационно-управляющих системах на основе каналов передачи данных по РЭС 0,4...10кВ. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. Т.3. №2. С. 84–87.
4. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2007. Т.1. №2. С. 167–171.
5. Тимохін О. В., Нестерко А. Б., Планіда А. О. Аналіз розподільчої електромережі 10кВ, як середовища передачі технологічної інформації в системах АСУ ТП: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. *"Політехніка"*. 2010. С. 70–73.
6. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Побудова коректуючих фільтрів для передачі інформації по розподільчим електричним мережам. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2015. С. 45–47.

7. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Технічні основи побудови фільтрів із заданими частотними характеристиками. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2016. С. 72–75.
8. Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення. *Технічна електродинаміка*. 2015. №5. С. 55–58.
9. Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Тимохін О. В. Особливості впровадження стандарту ІЕС61850 на підстанціях України: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. *Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. Т.1. "Політехніка"*. 2009. С. 169–173.
10. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2014. №4. С. 167–171.
11. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження енергосистем. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2013. №1. С. 39–43.
12. Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Тимохін О. В. Автоматичне частотне розвантаження на основі аналізу швидкості зміни кута напруги. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2012. №2. С. 104–109.
13. Циганенко Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні класу напруги: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата наук: Спеціальність 05.14.02 - Електричні станції, мережі та системи. Київ, 2017.
14. РД 34.08.502:01.08.1996. Основные научно-технические требования к созданию и развитию автоматизированных систем управления районов электрических сетей (АСУ РЭС) [Чинний від 01.08.1996]. М.: СПО

ОРГРЭС, 01.08.1996 (Отраслевой методический материал).  
URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816550.htm>.

15. Яндульский А. С. Управление распределительными электрическими сетями на основе информационно-управляющих систем: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: Специальность 05.14.02 - Электрические станции, сети и системы. Киев, 1997.
16. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Москва: Наука, 1969. 512с.
17. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань, Навчальний посібник. Львів: Видавництво національного університету "Львівська політехніка", 2007. 624с.
18. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», веб-сайт., 2010. 53с.  
URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>.
19. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Ковальчук О. А. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній мережі. *Праці ІЕД НАНУ. Спеціальний випуск*. 2011. С. 48–55.
20. Нестерко А. Б. Підвищення якості регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Київ, 2016. 150с.
21. Сердюк Б. М., Ліщук А. А. Використання показників SAIDI, SAIFI для економічної оцінки надійності електропостачання промислових підприємств. *Ефективна економіка*. 2012. №2. С. 222–227.  
URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek\\_2012\\_2\\_43](http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2012_2_43).
22. SAIDI, веб-сайт., 8.10.2016. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SAIDI>.
23. Agent-Oriented Designs for a Self Healing Smart Grid / Bou Ghosn S. et al. : 2010 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Gaithersburg, MD, USA, 4-6 Oct. 2010. P. 461–466.

24. Sarwar M., Asad B. A review on future power systems; technologies and research for smart grids : 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, Pakistan, 18-19 Oct. 2016. P. 1–6.
25. Brown R. E., Freeman L. Analyzing the reliability impact of distributed generation : Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, 15-19 July 2001. Vol. 2. P. 1013.
26. Farhangi H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2010. Vol. 8. №1. P. 18–28. DOI: 10.1109/MPE.2009.934876.
27. Статистичний аналіз дискретної інформації систем керування енергооб'єктами за умов спорадичності вхідних даних / Яндульський О. С. та ін. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2011. №2. С. 54–62.
28. Dynamic interactions of multiple functions of a power-angle controlled and vector-current controlled UPFC / Wang X. F. at al. : 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), Beijing, China, 28-29 May 2016. P. 93–96.
29. Ancillary Protective and Control Functions Common to Multiple Protective Relays / Chano S. R. at al. : 2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 11-14 April 2011. P. 396–482.
30. Khadkikar V., Kirtley J. L. Interline Photovoltaic (I-PV) power system — A novel concept of power flow control and management : Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 24-29 July 2011. P. 1–6.
31. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи. *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск*. 2010. С. 6–9. URL: <http://journals.uran.ua/index.php/2311-0767/article/view/55200>.
32. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В., Денисюк С. П. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 1*. 2011. С. 5–20.



33. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. №6. С. 44–50.
34. А.с. №1727203 СССР, Н 04 В 3/54. Устройство передачи информации по трехфазной воздушной линии электропередачи с наличием циклов транспозиции и расположением фазных проводов в одной горизонтальной плоскости / Книжник Р. Г., Зельцер А. Н., Погорелый Л. Г. №4767407/09; заявл. 13.11.1989; опубл. 15.04.1992, Бюл. №14.
35. Яндульский А. С., Гинайло В. А. Синтез системы управления промышленной электрической подстанцией. *Электрические сети и системы*. 2004. №3. С. 9–16.
36. Хохлов Ю. В. Системи дистанційного керування перетворювачами в умовах завод: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: Спеціальність 05.09.12 – Напівпровідникові перетворювачі електроенергії. Київ, 2005. 248с.
37. Скрыль В. Ф., Яндульский А. С. Передача телемеханической информации в автоматизированной система диспетчерского управления районом городской электрической сети. *Вестник Киевского политехнического института. Электроэнергетика*. 1982. Т.19. С. 68–71.
38. Костенко М. В., Перельман Л. М., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. Москва: Издательство "Энергия", 1973. 272с.
39. Шкарин Ю. П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередач. Москва: НТФ "Энергопрогресс", 2001. 72с.
40. Selander L. Load Profile and Communication Channel Characteristics of the Low Voltage Grid: DistribuTECH DA/DSM Europe 98 & Power Delivery Europe, 27-29 October 1998, London, UK.
41. Lindell G., Selander L. On Coding-, Diversity- and Receiver Strategies for the Powerline Communication Channel: Proc. 3rd International Symposium on

- Power-line Communications and its Applications, Lancaster, UK: Department of Information Technology, Telecommunication Theory Group. P.114–120.
42. A Novel Approach to Power-Line Channel Modeling / Gianaroli F. et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25. №1. P. 132–140. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035283.
  43. Banwell T., Galli S. A Novel Approach to the Modeling of the Indoor Power Line Channel Part I: Circuit Analysis and Companion Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. №2. P. 655–663. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.844326.
  44. Galli S., Banwell T. A Novel Approach to the Modeling of the Indoor Power Line Channel—Part II: Transfer Function and Its Properties. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. №3. P. 1869–1878. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848732.
  45. Cho S., Dhingra V. Street lighting control based on LonWorks power line communication : 2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), Jeju City, Jeju Island, South Korea, 2-4 April 2008. P. 396–398.
  46. Modeling and Analysis of Common-Mode Current Propagation in Broadband Power-Line Communication Networks / Pang T. S., So P. L., See K. Y., Kamarul A. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23. №1. P. 171–179. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911015.
  47. Meng H., Guan Y. L., Chen S. Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. №2. P. 630–637. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.844349.
  48. HomePlug green PHY for the LVDC PLC concept: Applicability study / Pinomaa A., Ahola J., Kosonen A., Nuutinen P. : 2015 International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), Austin, TX, USA, 29 March–1 April 2015. P. 205–210.
  49. ABB Switzerland Ltd. Communication networks. Power Line Carrier Communication. Design and Engineering, веб-сайт. 7p.

URL: [https://library.e.abb.com/public/a58cb6ad08e842038dc0eae2e6281e22/4CAE000453\\_PLC\\_Design%20and%20Engineering%20Brochure\\_A4\\_Web.pdf](https://library.e.abb.com/public/a58cb6ad08e842038dc0eae2e6281e22/4CAE000453_PLC_Design%20and%20Engineering%20Brochure_A4_Web.pdf)  
(Last accessed: 31.04.2018).

50. Siemens AG. Power network telecommunication. PowerLink – power line carrier system, веб-сайт. 14p.  
URL: <https://w3.siemens.com/smartgrid/global/drafts/services/metering-communications-services/smart-communications-solutions/Documents/PowerLink-plc-system.PDF> (Last accessed: 31.04.1018).
51. Мацевитий Ю. М., Шидловський А. К. Напрями розвитку електроенергетики та енергомашинобудування. *Вісн. НАН України*. 2006. №2. С. 17–23.  
URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/1976>.
52. Застосування засобів моніторингу перехідних режимів в ОЕС України при розв’язанні задач диспетчерського керування / Стогній Б. С., Кириленко О. В., Буткевич О. Ф., Сопель М. Ф. Київ: ІЕД НАНУ, 2009. Вип. 23. С. 147–155.
53. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы / под ред. акад. НАН Украины Кириленко А. В. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. 408с.
54. Буслов Л. И., Шестопапов В. Н. Помехоустойчивость приемных устройств ЦТУ при воздействии гармонической помехи. *Проблемы технической электродинамики*. 1970. №26. С. 43–49.
55. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П. Особенности централизованного управления нагрузками в энергосистеме: Киевский политехнический институт. №1583. Киев: Рукопись деп. в УкрНИИНТИ, 1979. 26с.
56. Микуцкий Г. В., Скитальцев В. С. Высокочастотная связь по линиям электропередач: Учебник для техникумов. Москва: Энергия, 1969. 448с.
57. Митюшкин К. Г. Телемеханика в энергосистемах. Москва: Энергия, 1974. 352с.

58. Скрыль В. Ф., Щербина Ю. В. Передача информации по силовым электрическим проводам. Киев: Общество "Знание" Украинской ССР, 1978. 20с.
59. Трач И. В. Передача информационных сигналов по распределительным электрическим сетям 10 кВ в тональном диапазоне частот: Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук: Специальность 05.14.02 – Электрические станции (электрическая часть), сети, электроэнергетические системы и управление ими. Киев, 1990. 19с.
60. Малышев А. И., Шкарин Ю. П. Специальные измерения высокочастотных каналов по линиям электропередачи. Москва: Энергия, 1979. 298с.
61. Application of power line communication in smart power Consumption / Liu J. at al. : ISPLC2010, Rio de Janeiro, Brazil, 28-31 March 2010. P. 303–307.
62. Marecek O. Monitoring and diagnostic system of power plant electrical equipment : 2016 Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), Pilsen, Czech Republic, 6-8 Sept. 2016. P. 1–4.
63. 1100-2005 IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment - Redline – IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, . 703p.
64. Smit J. J. Diagnostic technologies for embedded intelligence in high voltage power equipment : Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 24-29 July 2011. P. 1–4.
65. Energy management system with dynamic component control for efficiency optimization / Moskalenko N. at al. : 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, Germany, 14-17 Oct. 2012. P. 1–7.
66. Integration of distributed energy resources in the operation of energy management systems / Tarazona C., Muscholl M., Lopez R., Passelergue J. C. : 2009 IEEE-PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), Valencia, Spain, 28-30 Sept. 2009. P. 1–5.
67. Event-based and time-triggered energy consumption data acquisition in building automation / Jachimski M. at al. : 2015 International Conference on Event-based

- Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), Krakow, Poland, 17-19 June 2015. P. 1–6.
68. Research on the architecture of electric power information communication network for smart grid / Cui S., Yu Q., Gu G., Gang Q. : 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, 26-28 Nov. 2017. P. 1–4.
  69. Dehalwar V., Kalam A., Zayegh A. Infrastructure for real-time communication in smart grid : 2014 Saudi Arabia Smart Grid (SASG), Jeddah, Saudi Arabia, 14-17 Dec. 2014. P. 1–4.
  70. Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), веб-сайт. URL: [http://oasu-energo.com.ua/napravlenija\\_dejatelnosti/iddoc/3](http://oasu-energo.com.ua/napravlenija_dejatelnosti/iddoc/3) (Дата звернення: 05.06.2018).
  71. Структурная схема АСКУЭ, веб-сайт., 01.05.2016. URL: <http://eknis.net/uploads/files/struktura-askue.pdf>.
  72. УЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. Элементы систем АСКУЭ и учета энергоресурсов, веб-сайт., 01.06.2018. URL: <http://rit.kh.ua/elementy-sistem-askue-i-ucheta-energoresursov/>.
  73. Gaushell D. J., Block W. R. SCADA communication techniques and standards. *IEEE Computer Applications in Power*. 1993. Vol. 6. №3. P. 45–50. DOI: 10.1109/67.222741.
  74. Data transparency in PLC-based SCADA and metering protocols / Bratukhin A., Pratl G., Lobashov M., Maas P. : International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2005, Vancouver, BC, Canada, 6-8 April 2005. P. 76–79.
  75. Клименко А. Радиорелейная связь в энергетике при построении единых корпоративных сетей связи в аспекте телекоммуникационной составляющей АСКУЭ и АСУТП, веб-сайт., 13.03.2014. URL: <http://as.kz/radioreleynaya-svyaz-askue-asupt/> (Дата звернення: 28.08.2017).
  76. Клименко А. Цифровые радиорелейные линии связи в энергетике – актуальное решение при построении единых корпоративных сетей связи в

аспекте телекоммуникационной составляющей АСДТУ, АСУТП, АСКУЭ. *Энергетика*. 2015. Т.54. №3. С. 48–51. URL: <http://kazenergy.kz/arhiv/54/48-Цифровые-радиорелейные-линии.pdf>.

77. Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике / под ред. Ишкина В. Х. и Рокотяна С. С. Москва: "Энергия", 1977. 384с.
78. Ишкин В. Х. Основные этапы развития средств связи в энергетике. *Энергетик*. 1990. №9. С. 4–6. URL: <http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/osnovnye-etapy-razvitiya-sredstv-svyazi-v-energetike.html>.
79. Смирнов Б. В., Ильин А. А. Передача сигналов по распределительным электрическим сетям.: Основы теории и расчета. Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1963. 423с.
80. Bush S. F. Smart Grid, Communication-Enabled Intelligence for the Electric Power Grid. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. 570p.
81. Mohagheghi S., Stoupis J., Wang Z. Communication protocols and networks for power systems-current status and future trends : 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE), Seattle, WA, USA, 15-18 March 2009. P. 1–9.
82. Сетевая модель OSI, веб-сайт. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сетевая модель OSI](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сетевая_модель_OSI) (Дата звернення: 28.08.2017).
83. ANSI/TIA/EIA-232-F-1997:30.09.1997. Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange [Чинний від 30.09.1997] – Telecommunications Industry Association (TIA), 30.09.1997. 54p (American National Standart).
84. Интерфейсы RS-485, RS-422 и RS-232, веб-сайт. URL: [http://www.bookasutp.ru/Chapter2\\_3.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter2_3.aspx) (Дата звернення: 26.08.2017).
85. Cheng L. Study and application of DNP3.0 in SCADA system : Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, Heilongjiang, China, 12-14 Aug. 2011. P. 4563–4566.

86. Low cost solution for automation and control of MV substation using MODBUS-SCADA / Yellamandamma N., Rao K. V., Sai Kumar T., Aggarwal A. : 2009 International Conference on Power Systems, Kharagpur, India, 27-29 Dec. 2009. P. 1–6.
87. Skoko V., Atlagic B., Isakov N. Comparative realization of IEC 60870-5 industrial protocol standards : 2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, 25-27 Nov. 2014. P. 987–990.
88. IPEC 2007: 2007 International Power Engineering Conference : 3-6 December 2007. New York: IEEE, 2008. 1360p.
89. Protocol modification between substation and control center with IEC 60870-5-104 / Bualek C., Khunpeng W., Eua-Anant N., Paukatong T. : 2011 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Beijing, China, 16-20 Oct. 2011. P. 766–769.
90. Bagaria S., Prabhakar S. B., Saquib Z. Flexi-DNP3: Flexible distributed network protocol version 3 (DNP3) for SCADA security : 2011 International Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS), Kolkata, India, 21-23 Dec. 2011. P. 293–296.
91. ModBUS, веб-сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Modbus> (Дата звернення: 28.08.2017).
92. Протоколы связи в электроэнергетике и предпосылки для разработки МЭК 61850, веб-сайт. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2012/08/20/protokoly-svyazi-v-e-lektroe-nergetike/> (Дата звернення: 28.08.2017).
93. Модели OSI и TCP/IP, веб-сайт. URL: <https://www.oslogic.ru/knowledge/245/modeli-osi-i-tcp-ip/> (Дата звернення: 28.08.2017).
94. Гусев И. Обзор стандарта IEEE C37.118 и его требований к системам синхронизированных векторных измерений, веб-сайт. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2014/03/05/obzor-standarta-ieee-c37-118-i-ego-trebovaniij-k-sistemam-sinkhronizirovannykh-vektornykh-izmerenijj/> (Дата звернення: 28.08.2017).

95. Орлов Л. Л., Егоров Д. В. МЭК 61850 - новый стандарт для построения систем автоматизации в энергетике. *Электрические станции*. 2009. №11. С. 14–16.
96. Power-line communication, веб-сайт., 1.12.2017.  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Power-line\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Power-line_communication).
97. Takmaz E. Impedance, attenuation and noise measurements for power line communication : 2016 4th International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 20-21 April 2016. P. 1–4.
98. Measurement setup for characterizing low-voltage and outdoor electric distribution grids for PLC systems / Colen G. R. et al. : IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013, Sao Paulo: IEEE, 15-17 April 2013. P. 1–5.
99. Dostert K. Telecommunications over the Power Distribution Grid- Possibilities and Limitations: Internat. Symp. on Power Line Comms and its Applications, 1997. P.1-9.
100. Sellars M., Kostas D. Comparison of QPSK/QAM, OFDM, and Spread Spectrum for 5GHz PMP BWAS. *IEEE*. 2000.  
URL: [http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-00\\_23.pdf](http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-00_23.pdf).
101. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации. Москва: Советское Радио, 1976. 368с.
102. ГОСТ Р 51318.22:1999. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний [Чинний від 1999], 1999 (Государственный стандарт Российской федерации).  
URL: <http://www.cad.dp.ua/gost/files/51318-22-99.pdf>.
103. IEC/TR 61000-3-7:2008. Electromagnetic compatibility (EMC)--Limits--Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems [Чинний від 2008]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008.
104. Диксон Р. К. Широкополосные системы. Москва: Связь, 1979. 304с.



105. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. Москва: Изд. дом «Вильямс», 2004. 1104с.
106. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва: Радио и связь, 1985. 384с.
107. CDMA, веб-сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CDMA> (Дата звернення: 28.08.2017).
108. Широкополосные беспроводные сети передачи данных / Вишневский В. И., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Москва: Техносфера, 2005. 592с.
109. Псевдослучайная перестройка рабочей частоты, веб-сайт., 23/02/2016. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Псевдослучайная перестройка рабочей частоты](https://ru.wikipedia.org/wiki/Псевдослучайная_перестройка_рабочей_частоты).
110. OFDM, веб-сайт., 23/02/2016. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OFDM>.
111. IEEE 802.11a:December 2000. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks [Чинний від December 2000]. Santa Barbara, December 2000 (University of California).
112. Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN, веб-сайт. URL: [http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm).
113. Lampe L., Tonello A. M., Swart T. G. Power Line Communications. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 591p.
114. Modeling and Analysis of Power Line Communications for Application in Smart Grid/ Peck M. at al. : 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, Florida Atlantic University, Boca Raton, USA, September 19-21 2017.
115. Метод расширения спектра методом прямой последовательности, веб-сайт., 23/02/2016. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_расширения\\_спектра\\_методом\\_прямой\\_последовательности](http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_расширения_спектра_методом_прямой_последовательности).

116. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва: Наука, 1978. 831с.
117. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 4-е изд. Москва: Физматгиз, 1962. 1100с.
118. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Ленинград: ГОНТИ, 1938. Т.2. 500с.
119. Батлер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. Москва: Техносфера, 2004. 280с.
120. Чуи Ч. Введение в вейвлеты, Пер. с англ. Москва: Мир, 2001. 412с.
121. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов: Учебное пособие. Санкт-Петербург: ООО "МОДУС+", 1999. 152с.
122. Marchenko A., Tymokhin O., Tymokhina A. Analysis of low-frequency oscillations in power system using the wavelet transform. *Technical Electrodynamics*. 2015. №5. P. 55–58.  
URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84941029690&origin=resultslist&zone=contextBox#references>.
123. Белецкий Ф. Б. Основы теории линейных электрических цепей. Москва: Связь, 1967. 607с.
124. Рошан П., Лиэри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Москва: Изд. дом «Вильямс», 2004. 304с.
125. Петренко Л. И. Электрические сети, Сборник задач. 2-е изд. Киев: Вища шк. Головне вид-во, 1985. 271с.
126. Ильин В. А. Телеуправление и телеизмерение: Учебное пособие для вузов. 3-е изд. Москва: Энергоиздат, 1982. 560с.
127. Верник С. М., Кушнир С. В., Рудницкий В. Б. Повышение точности измерения в технике связи. Москва: 1981. 198с.
128. Акульшин П. К., Кощеев И. А., Кульбацкий К. Е. Теория связи по проводам. Москва: Связьиздат, 1940. 568с.
129. Акульшин П. К., Евланов С. Н. Основы теории электрической связи: Линейные системы с распределенными постоянными. 2. Москва: Связьиздат, 1960. 220с.

130. Огороднійчук І. П., Остроухов В. Д. Розрахунок каналів телемеханіки по розподільних електричних мережах. Київ: Видавництво "Техніка", 1972. 136с.
131. Щерба М. А. Математичне моделювання сильних електричних полів у нелінійних та неоднорідних діелектричних середовищах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2015. Вип. 40. С. 115–119.
132. Остренко М. В., Тарчуткин А. Л. Использование метода интегральных уравнений для снижения размерности конечно-элементной задачи электростатического поля. *Електротехніка та електроенергетика*. 2009. №2. С. 61–64.
133. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей: Учебное пособие. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009. 816с.
134. Flood transmission based protocol for home automation system via power line communication / Rashid R. A., Sarijari M. A., Rahim M. R.A., Tan Zun Yang : 2008 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 May 2008. P. 867–870.
135. A new approach for determination of the communication buses architecture based on IEC 6180 in substation automation system / Vadiati M. at al. : 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, Italy, 11-13 June 2008. P. 1023–1026.
136. AD835: 250 MHz, Voltage Output 4-Quadrant Multiplier Data Sheet (Rev. E). 14p. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD835.pdf> (Last accessed: 01.06.2018).

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

## Вихідні схеми дослідної розподільних електричних мереж 0,4...10 кВ та складових обладнання для експериментальних досліджень

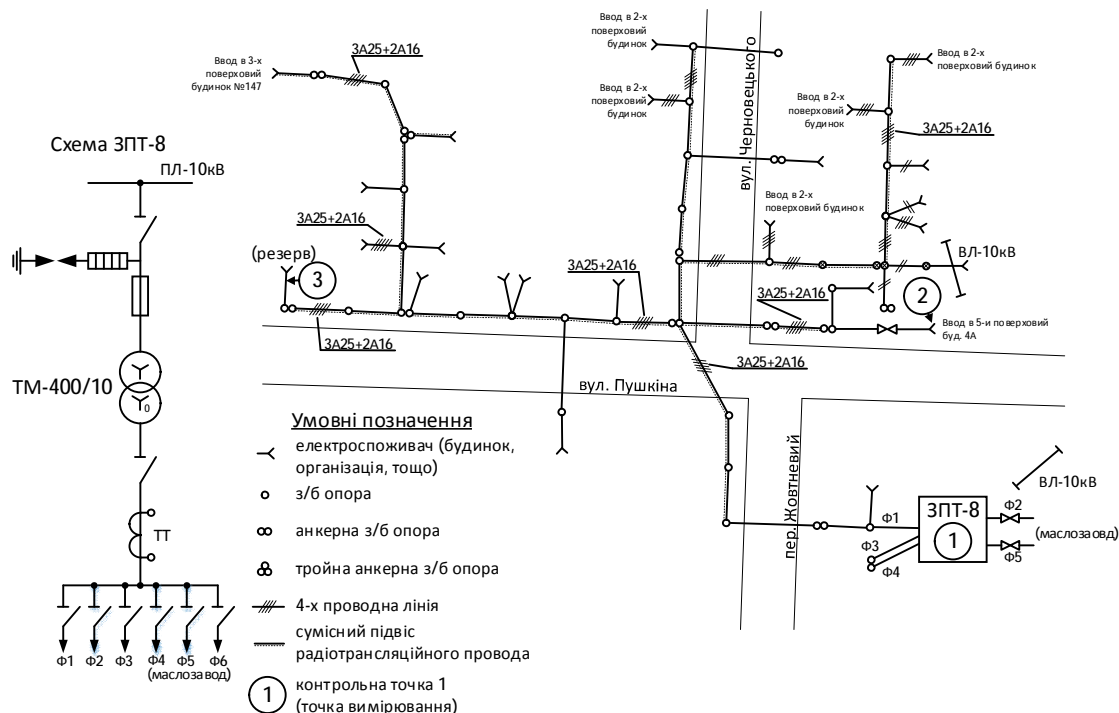


Рисунок А.1 – Поопорна схема електропостачання фідера 1 ЗТП №8 РЕМ 10...0,4 кВ п.г.т. Диканька

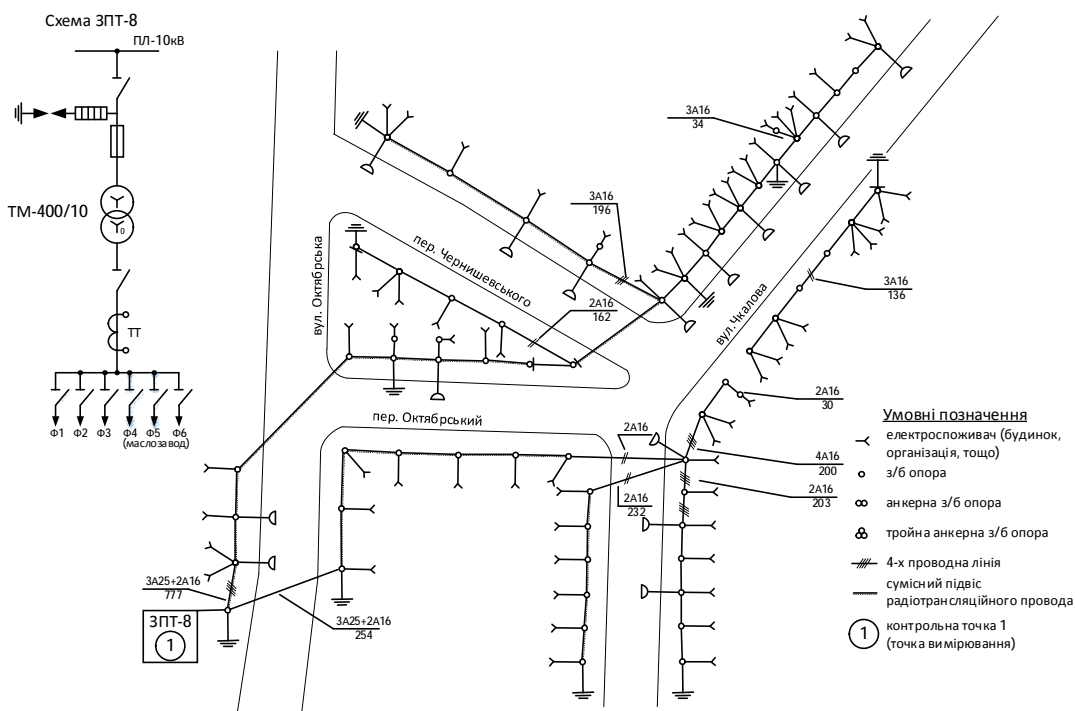


Рисунок А.2 – Поопорна схема електропостачання фідера 2 ЗТП №8 РЕМ 10...0,4 кВ п.г.т. Диканька

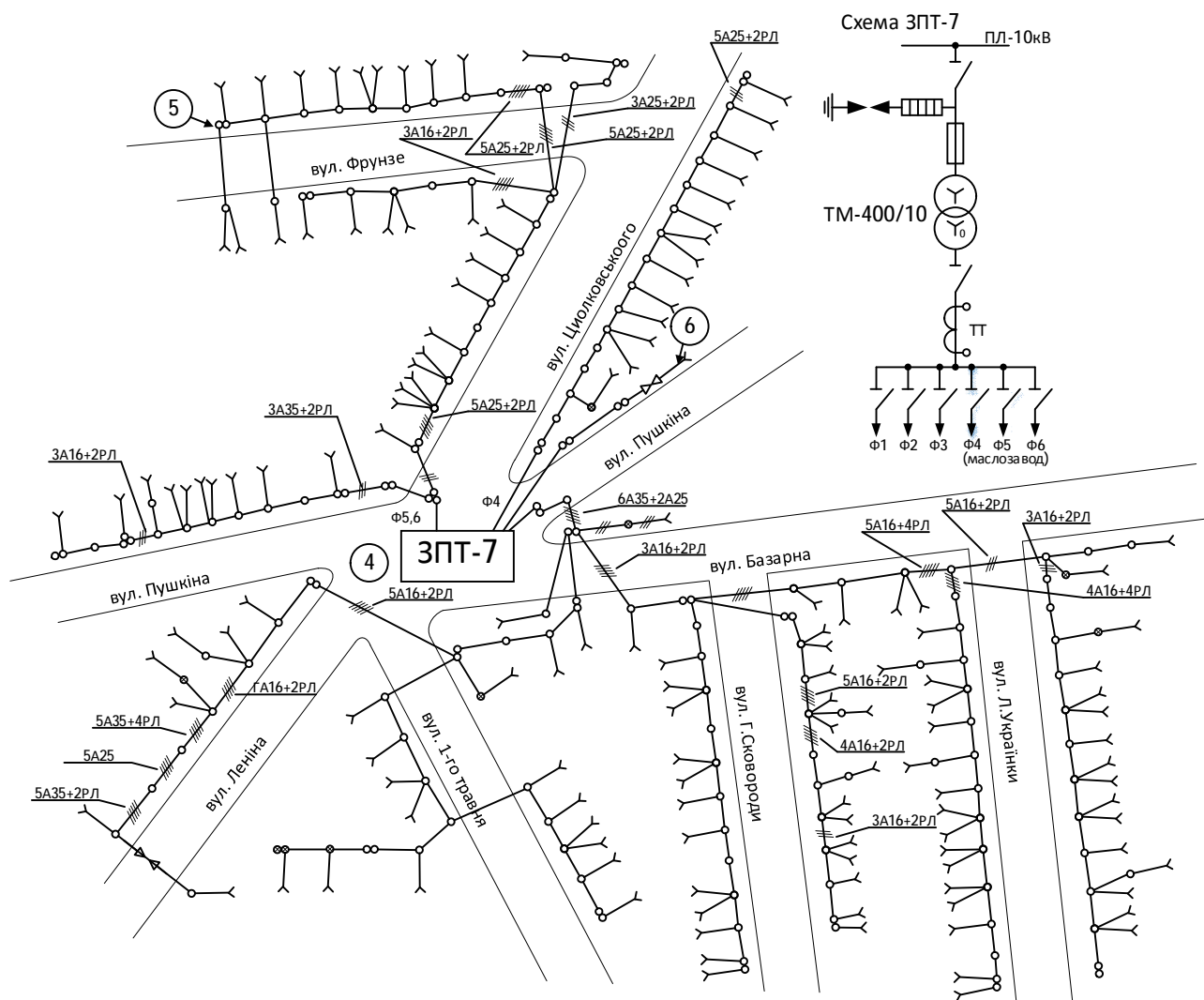


Рисунок А.3 – Поопорна схема електропостачання 0,4 кВ від ЗТП №7 РЕМ  
10...0,4 кВ п.г.т. Диканька

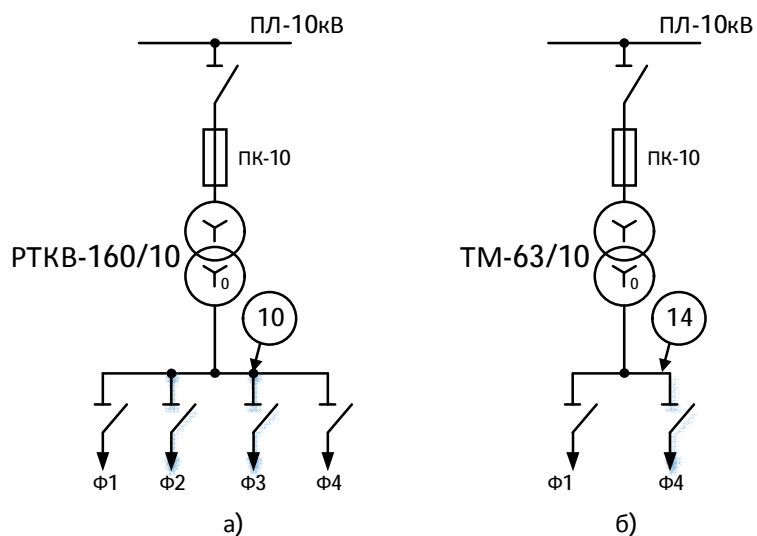


Рисунок А.4 – Схема КТП-9 а) та КТП-10 б) п.г.т. Диканька

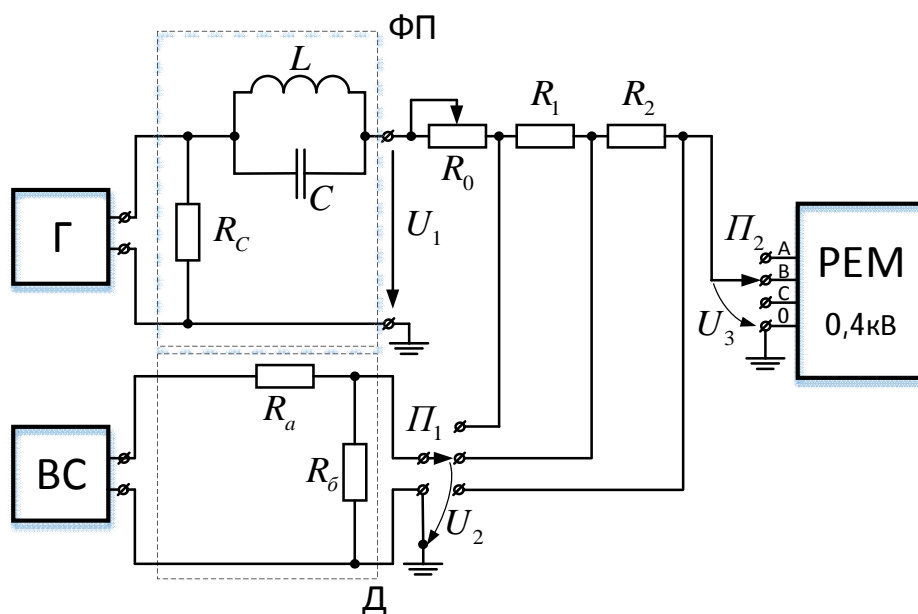


Рисунок А.5 – Схема вимірювального пристрою

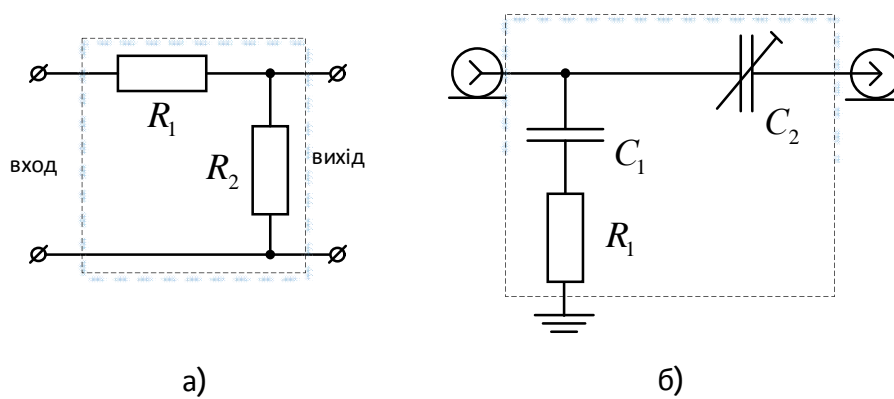


Рисунок А.6 – Принципова схема дільника напруги

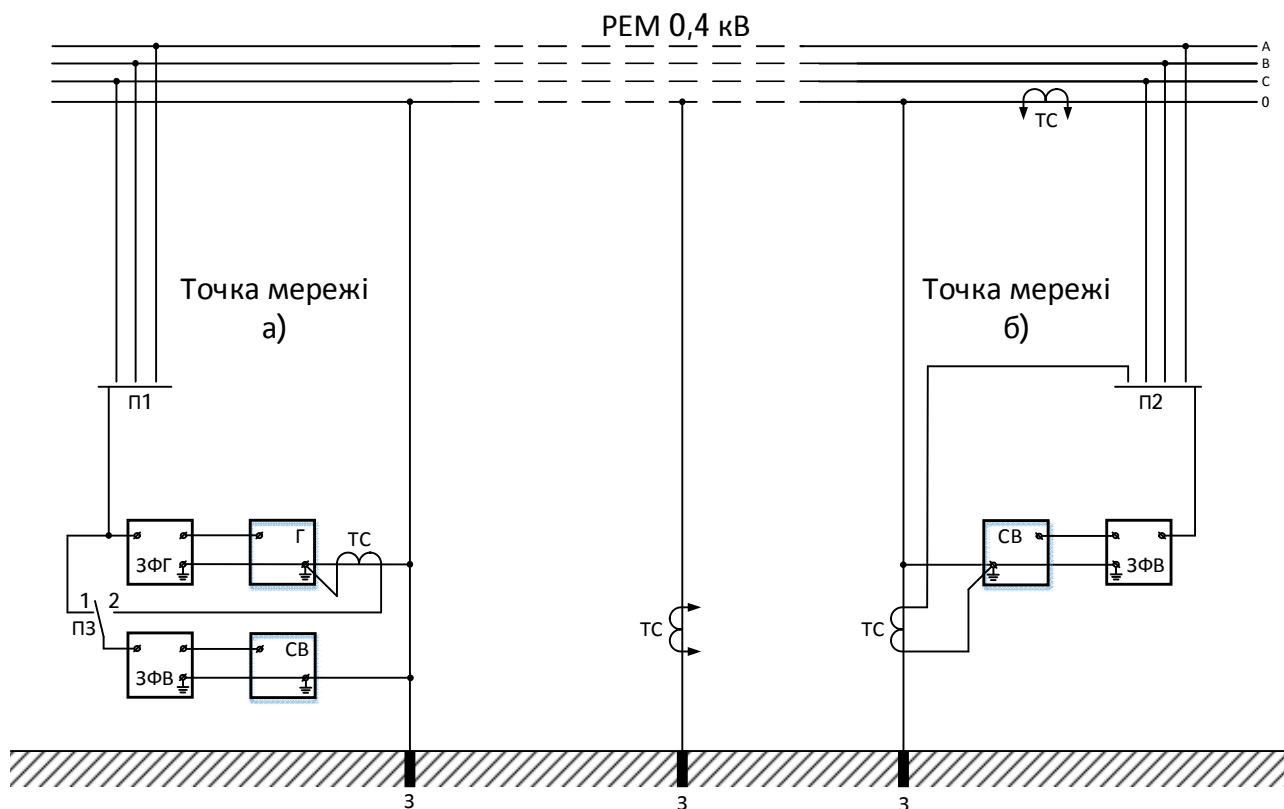


Рисунок А.7 – Схема приєднання приймально-передавальної апаратури до лінії 0,4 кВ

Г – генератор; СВ – селективний вольтметр; ЗФГ – загороджуючий фільтр генератора; ЗФВ – загороджуючий фільтр вольтметра; ТС – трансформатор струму; З – заземлення.



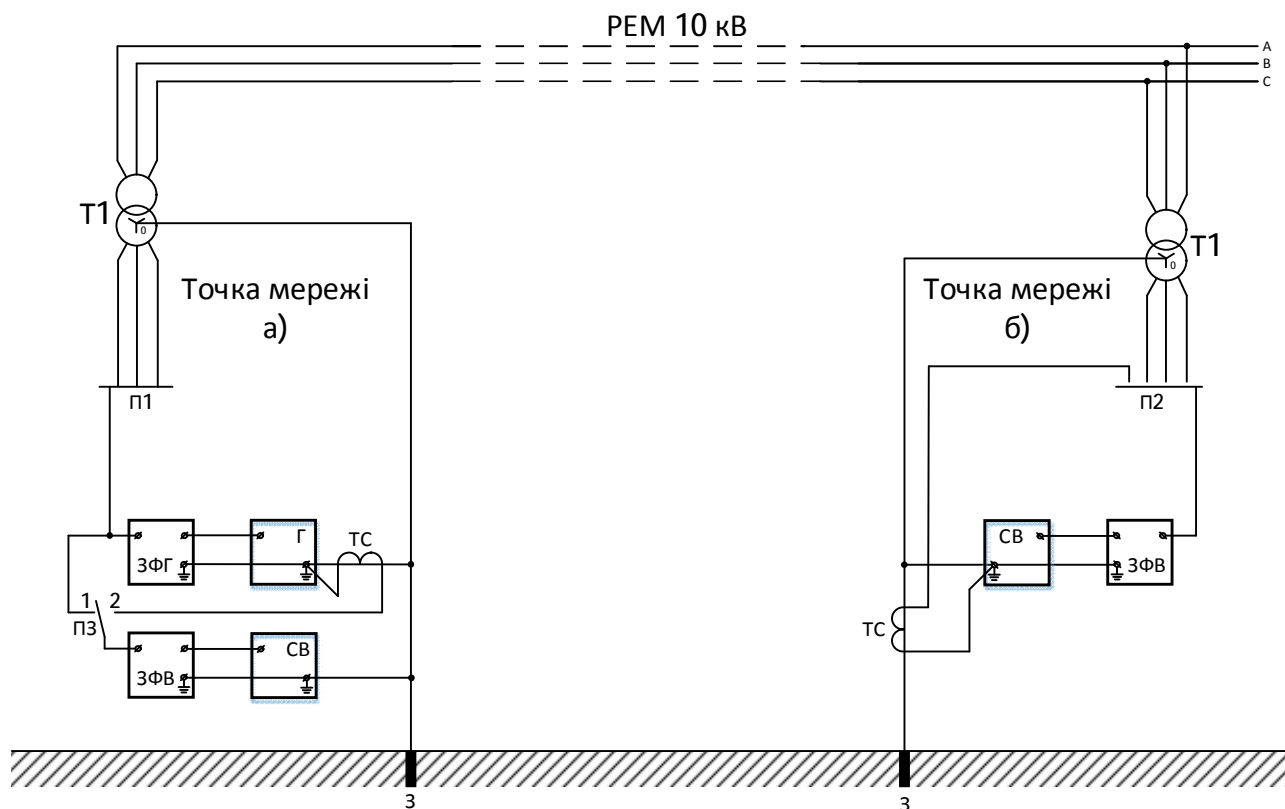


Рисунок А.8 – Схема приєднання приймально-передавальної апаратури до лінії 0,4 кВ для дослідження передачі сигналів по лінії 10 кВ

Г – генератор; СВ – селективний вольтметр; 3ФГ – загороджуючий фільтр генератора; 3ФВ – загороджуючий фільтр вольтметра; ТС – трансформатор струму; 3 – заземлення

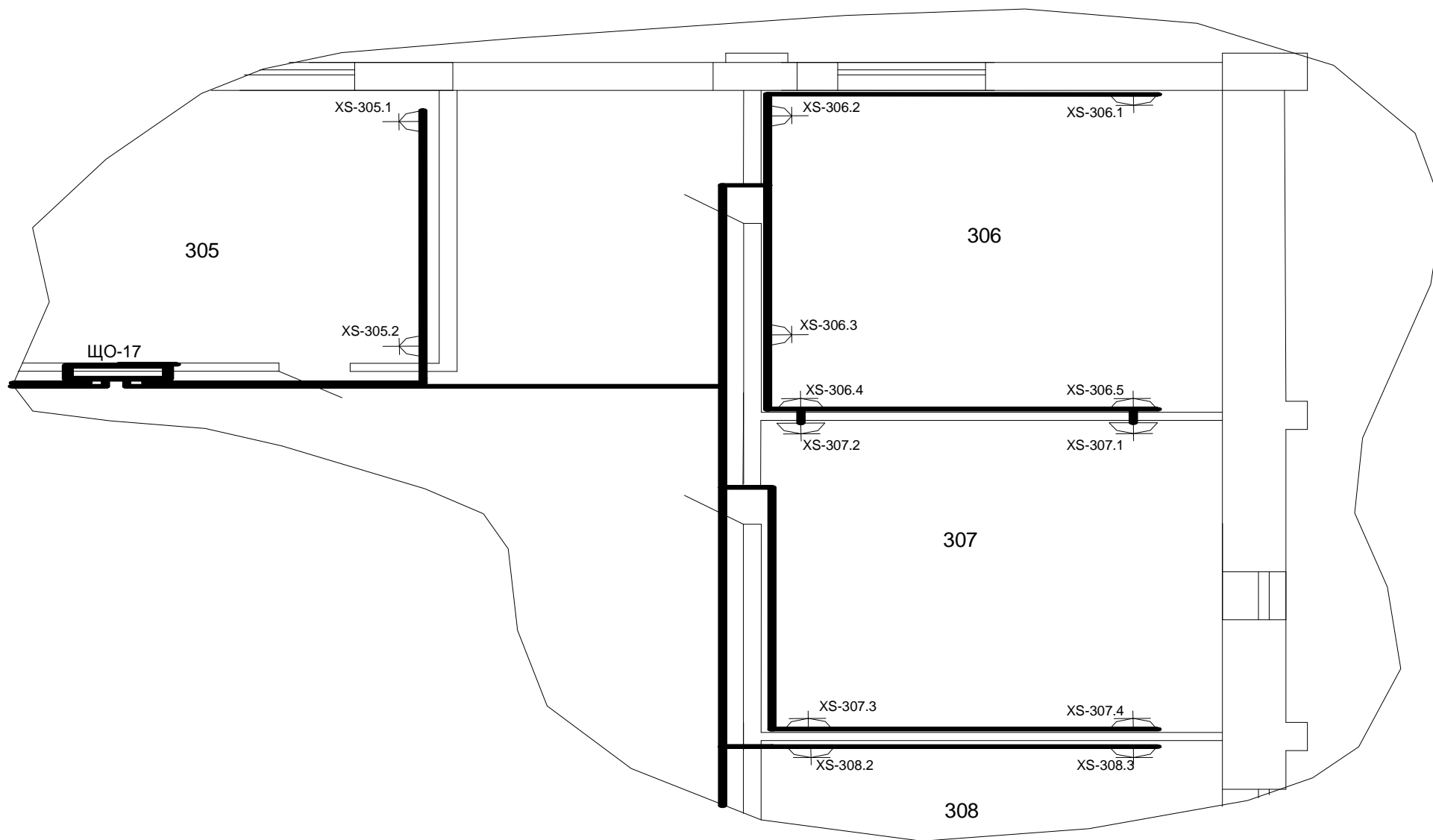


Рисунок А.9 – РЕМ 0,4 кВ кафедри автоматизації енергосистем корпусу №20 «КПІ імені Ігоря Сікорського»



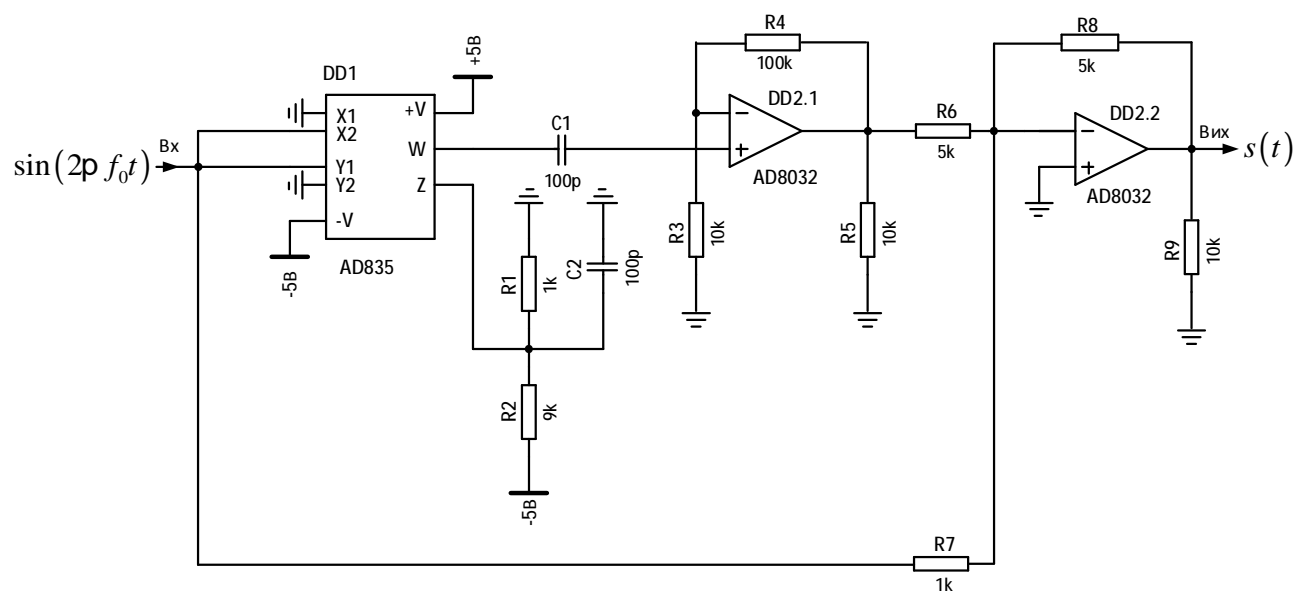


Рисунок А.12 – Принципова схема блоку перемноження сигналів

## ДОДАТОК Б

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. Т.1. С. 66–69.
2. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Обработка широкополосных сигналов в информационно-управляющих системах на основе каналов передачи данных по РЭС 0,4...10кВ. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. Т.3. №2. С. 84–87.
3. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния амплитудно- и фазочастотных характеристик канала передачи данных по РЭС 0,4...20 кВ на основе широкополосных сигналов. *Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*. 2006. Т.6. С. 42–45.
4. Яндульский А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2007. Т.1. №2. С. 167–171.
5. Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Тимохін О. В. Автоматичне частотне розвантаження на основі аналізу швидкості зміни кута напруги. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2012. №2. С. 104–109.
6. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження енергосистем. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2013. №1. С. 39–43.
7. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2014. №4. С. 167–171.
8. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній си / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. №6. С. 129–135.

9. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генеру / Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О., Тимохін О. В. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №5. С. 69–73.

10. Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення. *Технічна електродинаміка*. 2015. №5. С. 55–58.

11. Тимохін О. В., Нестерко А. Б., Планіда А. О. Аналіз розподільчої електромережі 10кВ, як середовища передачі технологічної інформації в системах АСУ ТП: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. *"Політехніка"*. 2010. С. 70–73.

12. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Побудова коректуючих фільтрів для передачі інформації по розподільчим електричним мережам. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2015. С. 45–47.

13. Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. Технічні основи побудови фільтрів із заданими частотними характеристиками. *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ"*. 2016. С. 72–75.

14. Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Тимохін О. В. Особливості впровадження стандарту ІЕС61850 на підстанціях України: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. *"Політехніка"*. 2009. Т.1. С. 169–173.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

15. Яндульський А. С., Тимохин А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *П'ята міжнародна науково-практична конференція "Комп'ютерні системи в*

*автоматизації виробничих процесів”, Тези доповідей. 20-23 травня 2007р., Хмельницький національний університет, Хмельницький – С.67.*

16. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ // *ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 22-24 жовтня 2013р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.125*

17. Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Тези доповідей. 29 червня – 2 липня 2014р. Луцький національний технічний університет, Луцьк-Шацькі озера – С.212-213*

18. Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення. *Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». Тези доповідей. 9-12 червня 2015р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – видання на CD-диску*

19. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / Яндульський О.С., Тимохін О.В., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. *ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.66*

20. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О., Тимохін О.В. *ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 11-13 жовтня 2017 р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця.*

## ДОДАТОК В

### Акт про впровадження

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Декан факультету електроенергії та автоматики  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»,  
проф., д.т.н. Яндульський О.С.  
«*02*» *02* 2018 р.

### АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

**Об'єкт впровадження:** науково-методичні розробки щодо Інформаційного забезпечення систем керування електричними мережами на основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ.

**Автор розробки:** Тимохін О.В., старший викладач кафедри автоматизації енергосистем КІІІ ім. Ігоря Сікорського.

**Джерела інформації:**

1. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ / Тимохін О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014(1). – С. 66–69.

2. Яндульський А. С. [и др.] Обработка широкополосных сигналов в информационно-управляющих системах на основе каналов передачи данных по РЭС 0,4...10кВ / Яндульський А. С., Тимохин А. В. // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2006(3). – №2 – С. 84–87.

3. Яндульський А. С. [и др.] Оценка влияния амплитудно- и фазочастотных характеристик канала передачи данных по РЭС 0,4...20 кВ на основе широкополосных сигналов / Яндульський А. С., Тимохин А. В. // Проблеми сучасної електротехніки. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2006(6). – С. 42–45.

4. Яндульський А. С. [и др.] Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях / Яндульський А. С., Тимохин А. В. // Вісник



Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007(1). – №2 – С. 167–171.

5. Яндульський О. С. [и др.] Автоматичне частотне розвантаження на основі аналізу швидкості зміни кута напруги / Яндульський О. С., Тимохіна А. О., Тимохін О. В. // Науковий журнал «Гіпергетика: економіка, технології, екологія». – 2012 – №2 – С. 104–109.

6. Яндульський О. С. [и др.] Підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження енергосистем / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013 – №1 – С. 39–43.

7. Яндульський О. С. [и др.] Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014 – №4 – С. 167–171.

8. Яндульський О. С. [и др.] Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній си / Яндульський О. С., Тимохін О. В., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015 – №6 – С. 129–135.

9. Яндульський О. С. [и др.] Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генеру / Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Труніна Г. О., Тимохін О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017 – №5 – С. 69–73.

10. Марченко А. А. [и др.] Аналіз низькочастотних коливань в енергосистемі з використанням вейвлет-перетворення / Марченко А. А., Тимохін О. В., Тимохіна А. О. // Технічна електродинаміка. – 2015 – №5 – С. 55–58.

11. Тимохін О. В. [и др.] Аналіз розподільчої електромережі 10кВ, як середовища передачі технологічної інформації в системах АСУ ТП: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та

автоматики / Тимохін О. В., Нестерко А. Б., Платіда А. О. // "Політехніка". – 2010 – С. 70–73.

12. Тимохін О. В. [и др.] Побудова коректуючих фільтрів для передачі інформації по розподільчим електричним мережам / Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – 2015 – С. 45–47.

13. Тимохін О. В. [и др.] Технічні основи побудови фільтрів із заданими частотними характеристиками / Тимохін О. В., Юрчик Ю. К. // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ". – 2016 – С. 72–75.

14. Яндульський О. С. [и др.] Особливості впровадження стандарту ІЕС61850 на підстанціях України: Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. Т.1 / Яндульський О. С., Нестерко А. Б., Тимохін О. В. // "Політехніка". – 2009 – С. 169–173.

**Результати впровадження:** наукові та науково-методичні розробки ст. викладача Тимохіна О.В. щодо підвищення ефективності передачі інформаційних сигналів по розподільних електричних мережах 0,4...10 кВ впроваджено у навчальний процес кафедри автоматизації енергосистем в курсі «Основи та засоби передачі інформації» під час курсового та дипломного проектування.

**Відповідальні за впровадження:**


*В.о. завідувача кафедри*

*автоматизації енергосистем, к.т.н., доц.*

 А.А. Марченко

*Старший викладач кафедри*

*автоматизації енергосистем*

 О.В. Тимохін

**ДОДАТОК Г**  
**Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Академії НАН України

М.Ю. Ільченко

2018 р.



Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Тимохіна Олександра Вікторовича

**«ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ НА ОСНОВІ ПЕРЕДАЧІ  
ШИРОКОПОЛОСНИХ СИГНАЛІВ ПО РЕМ 0,4...10 кВ»**

Окремі результати дисертаційної роботи Тимохіна Олександра Вікторовича «Інформаційне забезпечення систем керування електричними мережами на основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи, були використані при виконанні договору №236 від 1 червня 2000р. між НТУУ «КПІ» та НГВУ «Чернігівнафтогаз» «Розробка капальних адаптерів та контролерів об'єктів інформаційно-керуючої системи електроспоживання об'єктів НГВУ «Чернігівнафтогаз».

Зокрема в роботі використовувалися:

- Результатів розробки підходу до оцінки впливу частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ на процес передачі сигналів;
- Результати розробки блоку формування зфазованих сигналів для дослідження ФЧХ РЕМ 0,4 кВ;
- Результати експериментального дослідження частотних характеристик РЕМ 0,4...10 кВ п.г.т. Диканька;
- Результати розробки блоку формування модулюючої функції для побудови сигналів з підвищеною ефективністю використання частотного спектру.

Результати роботи впроваджені в інтегрованій системі управління установками ГЗУ НГВУ "Чернігівнафтогаз"

Керівник ЦДР №236

Декан факультету електроенергетичної  
та автоматики

КПІ ім. Ігоря Сікорського, д.т.н., проф.

Яндурський О.С.